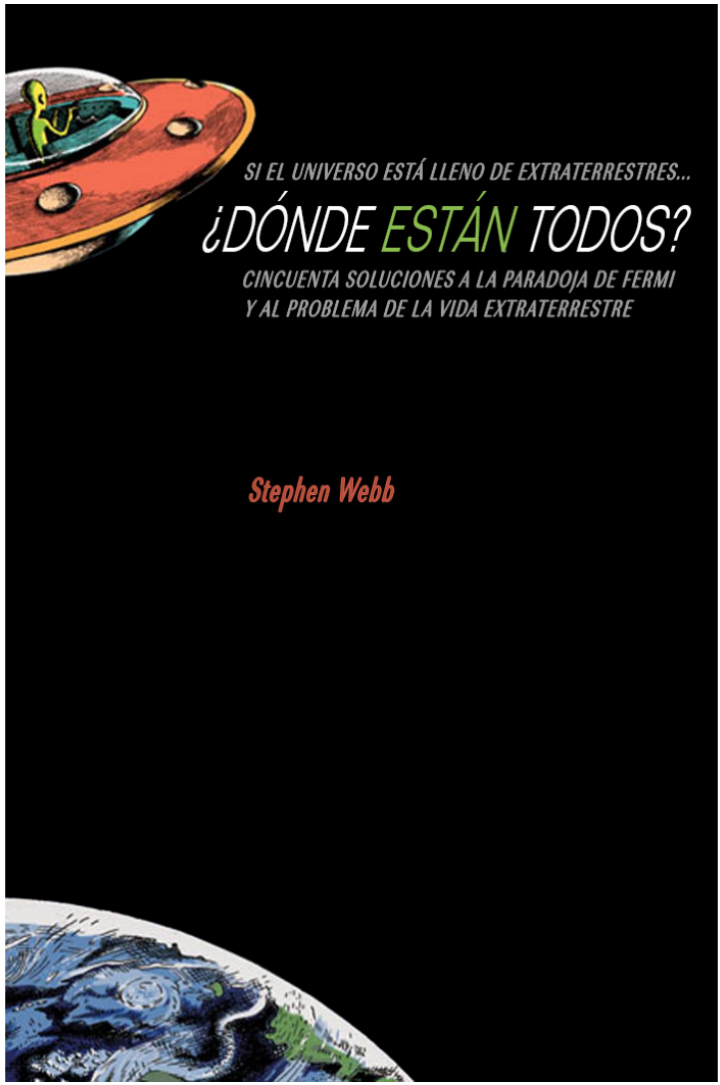

SI EL UNIVERSO ESTÁ LLENO DE EXTRATERRESTRES...
¿DÓNDE ESTÁN TODOS?
CINCUENTA SOLUCIONES A LA PARADOJA DE FERMI
Y AL PROBLEMA DE LA VIDA EXTRATERRESTRE
Stephen Webb

SI EL UNIVERSO ESTÁ LLENO DE EXTRATERRESTRES...

¿DÓNDE ESTÁN TODOS?

CINCUENTA SOLUCIONES A LA PARADOJA DE FERMI
Y AL PROBLEMA DE LA VIDA EXTRATERRESTRE

Stephen Webb

Título original: WHERE IS EVERYBODY?
— 2002 —

Versión en español:
Alexei Leonov
Sargont
(Colaboración de John_Tarkus)
— 2018 —

To Heike

CONTENIDO

Prefacio

Créditos de las imágenes

Capítulo 1 ¿Dónde están todos?

Capítulo 2 De Fermi y la paradoja

ENRICO FERMI
PARADOJA
LA PARADOJA DE FERMI

Capítulo 3 Ellos Están Aquí

SOLUCIÓN 1 Están aquí y se llaman a sí mismos húngaros
SOLUCIÓN 2 Están aquí y se inmiscuyen en los asuntos humanos
SOLUCIÓN 3 Estaban aquí y dejaron evidencia de su presencia
SOLUCIÓN 4 Ellos existen y somos nosotros — ¡Todos somos extraterrestres!
SOLUCIÓN 5 El Escenario del Zoológico
SOLUCIÓN 6 El Escenario de Interdicción
SOLUCIÓN 7 La Hipótesis del Planetario
SOLUCIÓN 8 Dios Existe

Capítulo 4 Existen pero aún no se han comunicado

SOLUCIÓN 9 Las estrellas están muy lejos
SOLUCIÓN 10 No han tenido tiempo de ponerse en contacto con nosotros
SOLUCIÓN 11 Un enfoque de la teoría de la percolación
SOLUCIÓN 12 Sondas Bracewell-von Neumann
SOLUCIÓN 13 Somos chauvinistas solares
SOLUCIÓN 14 Se quedan en casa...
SOLUCIÓN 15 ...y Navegan por la Red
SOLUCIÓN 16 Están emitiendo señales pero no sabemos cómo escuchar
SOLUCIÓN 17 Están emitiendo señales pero no sabemos qué frecuencia escuchar
SOLUCIÓN 18 Nuestra estrategia de búsqueda es errónea
SOLUCIÓN 19 La señal ya está presente en los datos
SOLUCIÓN 20 No hemos escuchado lo suficiente
SOLUCIÓN 21 Todos está escuchando, ninguno está transmitiendo
SOLUCIÓN 22 Berserkers
SOLUCIÓN 23 No desean comunicarse
SOLUCIÓN 24 Desarrollan una matemática diferente
SOLUCIÓN 25 Están llamando pero no reconocemos la señal
SOLUCIÓN 26 Están en algún lugar pero el universo es más extraño de lo que imaginamos
SOLUCIÓN 27 Una elección de catástrofes
SOLUCIÓN 28 Llegan a la Singularidad
SOLUCIÓN 29 Los cielos nublados son comunes

SOLUCIÓN 30 Existen infinidad de CETs, pero sólo una dentro de nuestro horizonte de partículas: Nosotros

Capítulo 5 Ellos no Existen

SOLUCIÓN 31 El Universo está aquí para nosotros

SOLUCIÓN 32 La vida puede haber surgido recientemente

SOLUCIÓN 33 Los sistemas planetarios son raros

SOLUCIÓN 34 Somos los primeros

SOLUCIÓN 35 Los planetas rocosos son raros

SOLUCIÓN 36 Las zonas continuamente habitables son estrechas

SOLUCIÓN 37 Los Júpiter son raros

SOLUCIÓN 38 La Tierra tiene una óptima "Bomba de Evolución"

SOLUCIÓN 39 La galaxia es un lugar peligroso

SOLUCIÓN 40 Un sistema planetario es un lugar peligroso

SOLUCIÓN 41 El sistema de placas tectónicas de la Tierra es único

SOLUCIÓN 42 La Luna es única

SOLUCIÓN 43 La Génesis de la Vida es rara

SOLUCIÓN 44 La Transición Procariota-Eucariota es Rara

SOLUCIÓN 45 Las especies fabricantes de herramientas son raras

SOLUCIÓN 46 El progreso tecnológico no es inevitable

SOLUCIÓN 47 La inteligencia a nivel humano es rara

SOLUCIÓN 48 El lenguaje es exclusivo de los seres humanos

SOLUCIÓN 49 La ciencia no es inevitable

Capítulo 6 Conclusión

SOLUCIÓN 50 La paradoja de Fermi resuelta...

Capítulo 7 Referencias

Acrónimos utilizados en el libro

PREFACIO

Este libro trata sobre la paradoja de Fermi — la contradicción entre la aparente ausencia de extraterrestres, y la expectativa común de que deberíamos ver evidencia de su existencia. Me fascinó la paradoja cuando la conocí por primera vez hace unos 17 años, y todavía me fascina. A lo largo de esos años, muchos autores (demasiados para mencionarlos aquí, aunque sus nombres aparecen en la lista de referencias al final de este libro) me han cautivado con sus escritos sobre la paradoja. Su influencia en este trabajo será clara. También he hablado de la paradoja con muchos amigos y colegas; aunque son demasiado numerosos para mencionarlos individualmente, estoy en deuda con todos ellos.

Varias personas han contribuido directamente a la redacción de este libro, y me gustaría aprovechar esta oportunidad para darles las gracias. Clive Horwood de Praxis Publishing, John Watson de Springer-Verlag y Paul Farrell de Copernicus Books han apoyado mucho el proyecto; el libro no se habría terminado si no hubiera sido por su consejo y aliento. (También me gustaría agradecer a John por compartir su favorita resolución de la paradoja sobre un agradable almuerzo de trabajo. Stuart Clark proporcionó muchos comentarios útiles sobre un borrador inicial del manuscrito; Bob Marriott y Timothy Yohn captaron varios errores y solecismos en un borrador posterior (Bob también me envió una lista de 101 resoluciones de la paradoja – con 75 de las cuales estoy de acuerdo); y estoy extremadamente agradecido a Steve Gillett por corregirme en muchos puntos científicos. Mareike Paessler fue una editora de producción excepcionalmente observadora y servicial. Su concienzudo trabajo con la Editora Asistente Anna Painter mejoró enormemente el texto. Varios autores y organizaciones dieron permiso amablemente para reproducir figuras; estoy particularmente agradecido de agradecer a Lora Gordon, Geoffrey Landis, Ian Wall, Susan Lendroth, Reinhard Rachel, Heather Lindsay y Merrideth Miller por su ayuda para obtener figuras adecuadas. Paul Bell suavemente corrigió mi error de identificación de Feynman en la Figura 28, y compartió algunas ideas interesantes sobre la paradoja. Me gustaría agradecer a David Glasper por compartir sus recuerdos de un incidente de la infancia que nos afectó a ambos. Finalmente, por supuesto, me gustaría agradecer a mi familia — Heike, Ron, Ronnie, Peter, Jackie, Emily y Abigail — por su paciencia. Pasé tiempo escribiendo que debería haber compartido con ellos.

Stephen Webb
Milton Keynes, julio de 2002

CREDITOS DE LAS IMÁGENES

Me gustaría reconocer las siguientes fuentes y los titulares de los derechos de autor por otorgar permiso para usar sus imágenes.

Las figuras 1, 6, 7, 8, 10 y 28 son cortesía del Instituto Americano de Física Emilio Segré Visual Archives. La figura 5 es ©The New Yorker Collection 1950 Alan Dunn de cartoonbank.com. Todos los derechos reservados.

Las Figuras 9 y 29 son fotografías de la Liga SETI, usadas con permiso.

Las figuras 13, 15-19, 21, 22, 44-46, 48-52, 57-60 y 70 son cortesía de la NASA. La Figura 14 es cortesía de la Sociedad Astronómica del Pacífico. La figura 20 es cortesía de Radford University y Lora Gordon. La Figura 23 es cortesía de Michael Carroll y la Organización Planetaria. La figura 25 es cortesía de IoP y Miguel Alcubierre Moya. La figura 27 es cortesía de Geoffrey Landis. La figura 30 es cortesía de LIGO. La figura 31 es cortesía de Antares — F. Montanet ccpm/in2p3/cnrs — Université Mediterranée. Las figuras 33 y 34 son cortesía del Instituto SETI, utilizado con permiso. La Figura 40 es cortesía de Michael Daly, Universidad de Ciencias de la Salud de Servicios Uniformados. La figura 41 es cortesía de CERN. La Figura 43 es ©Frederik Ramm
(ver http://www.remote.org/frederik/culture/berlin/).

La figura 53 es cortesía de la NASA/P.J.T. Leonard, y la figura 54 es cortesía de la NASA/Don Davis. Figura 55 es cortesía de NOAA; fotógrafo Michael Van Woert. La figura 56 es cortesía de NOAA. Las cuatro imágenes de la Figura 62 son cortesía del Prof. Dr. K. O. Stetter y del Dr. R. Rachel, Universität Regensburg, Mikrobiologie; ©University of Regensburg. La figura 64 es cortesía del Wellcome Trust. La Figura 67 es ©US Department of Energy Human Genome Project. Figura 69 es ©Arizona State University, fotografía de Alan Riggs. Figura 71 es cortesía de Creswell Crags, ©Creswell Heritage Trust.

1

¿Dónde están todos?

Hay algo seductor en la paradoja. Las huellas imposibles y paradójicas de Maurits Escher nunca dejan de engañar al ojo. Poemas como *Warning to Children* (Advertencia a los niños) de Robert Graves, que juegan con la paradoja de la regresión infinita, hacen girar la cabeza. La paradoja se encuentra en el corazón del *Catch-22* de Joseph Heller, una de las más grandes novelas del siglo XX. Mi paradoja favorita, sin embargo, es la de Fermi.

Me encontré por primera vez con la paradoja de Fermi en el verano de 1984. Acababa de graduarme en la Universidad de Bristol, y debería haber pasado los meses de verano estudiando *Gauge Theories in Particle Physics* de Aitchison y Hey — lectura obligatoria antes de comenzar mis estudios de postgrado en la Universidad de Manchester. En cambio, pasé mi tiempo disfrutando del sol en las Bristol Downs, estudiando mi material de lectura favorito: la *Revista de Ciencia Ficción de Isaac Asimov (Isaac Asimov's Science Fiction Magazine [IASFM])*. (Como con mucha gente, la SF despertó mi interés por la ciencia. Fue leyendo las obras de Isaac Asimov, Arthur Clarke y Robert Heinlein y viendo películas como *Planeta Prohibido* que me enamoré de la ciencia.[1]) Dos artículos de hechos científicos que incitaban a la reflexión aparecieron en ediciones sucesivas de IASFM ese año. La primera, de Stephen Gillett, se titulaba simplemente La paradoja de Fermi. La segunda, una contundente refutación de Robert Freitas, se titulaba *Fermi's Paradox: A Real Howler* (La paradoja de Fermi: un verdadero aullador).[2]

Gillett argumentaba de la siguiente manera. Supongamos, como creían los optimistas, que la galaxia es el hogar de muchas civilizaciones extraterrestres. (Para ahorrar escribir a máquina, me referiré a menudo a una *civilización extraterrestre* como una CET. Entonces, dado que la Galaxia es extremadamente antigua, es muy probable que las CETs nos lleven millones o incluso miles de millones de años de ventaja. El astrofísico ruso Nikolai Kardashev propuso una manera útil de pensar sobre tales civilizaciones. Sostuvo que las CETs tendrían uno de los tres niveles de tecnología. Una civilización Kardashev tipo 1, o civilización K1, sería comparable a la nuestra: podría emplear los recursos energéticos de un planeta. Una civilización K2 estaría más allá de la nuestra: podría emplear los recursos energéticos de una estrella. Una civilización K3 podría emplear los recursos energéticos de toda una galaxia. Según Gillett, entonces, la mayoría de las CETs en la Galaxia serían de tipo K2 o K3. Ahora, todo lo que sabemos sobre la vida terrestre nos dice que la vida tiene una tendencia natural a expandirse a

todo el espacio disponible. ¿Por qué debería ser diferente la vida extraterrestre? Seguramente las CETs querrían expandirse desde su mundo natal hacia la Galaxia. El punto clave, sin embargo, es que una CET tecnológicamente avanzada podría colonizar la Galaxia en unos pocos millones de años. ¡Ya deberían estar aquí! La Galaxia debería estar llena de vida. Y sin embargo, no vemos ninguna prueba de que existan CETs. Gillett llamó a esto la paradoja de Fermi. (Me enteré de por qué el nombre de Fermi está vinculado a la paradoja unos meses después, cuando Eric Jones publicó un preimpreso de Los Álamos describiendo los orígenes de la paradoja; pero más tarde. Para Gillett, la paradoja apuntaba a una conclusión escalofriante: la humanidad está sola en el Universo.

Freitas pensó que todo esto era una tontería. Comparó la lógica de Gillett con el siguiente argumento: Los lemmings se reproducen rápidamente — alrededor de 3 camadas por año, con cada camada conteniendo hasta 8 crías. En pocos años la masa total de lemmings será igual a la masa de toda la biosfera terrestre. La Tierra debe estar llena de lemmings. Y sin embargo, la mayoría de nosotros no vemos evidencia de que los lemmings existan. ¿Has visto alguna vez un lemming? La línea de razonamiento de la "paradoja de Fermi" nos llevaría a la conclusión de que los lemmings no existen; sin embargo, como Freitas señaló, esto sería absurdo. Más interesante aún, él creía que la falta de evidencia para las CETs no es particularmente fuerte: si se estacionaran pequeñas sondas artificiales en el Cinturón de Asteroides, digamos, o sondas más grandes en la Nube Oort, entonces no tendríamos ninguna posibilidad de detectarlas. Además, argumentó que la lógica detrás de la llamada paradoja es defectuosa. Los dos primeros pasos del argumento son: (i) si existen alienígenas, entonces deberían estar aquí; (ii) si están aquí, entonces deberíamos observarlos. La dificultad es que esos dos "deberían". Un "debería" no es un "deber", y por lo tanto es lógicamente incorrecto invertir la flecha de la implicación. (En otras palabras, el hecho de que no los hayamos observado no nos permite concluir que no están aquí, así que no podemos concluir que no existen.

Hasta que haya evidencia clara para resolver una paradoja, las personas son libres de seguir diferentes líneas de razonamiento. Esto es lo que hace que una paradoja sea tan interesante. En el caso de la paradoja de Fermi, lo que está en juego es tan alto (la existencia o no de inteligencia alienígena) y la entrada experimental al argumento es tan escasa (incluso ahora, no podemos estar seguros de que las CETs no estén aquí) que los argumentos a menudo se vuelven acalorados. En el debate sobre Gillett-Freitas, inicialmente me puse del lado de Freitas. La razón principal fue el puro peso de los números: tal vez hay hasta 400 mil millones de estrellas en la Galaxia, y tantas galaxias en el Universo como estrellas hay en la Galaxia. Desde Copérnico, la ciencia nos ha enseñado que no hay nada especial en la Tierra. Se dedujo, entonces, que la Tierra no podía ser el único hogar para la vida inteligente. Y sin embargo....

No podía quitarme de la cabeza el argumento de Gillett. Había estado

leyendo sobre maravillas cósmicas desde que era niño. La civilización que abarca toda la galaxia de la trilogía de la Fundación, las maravillas de la astroingeniería de *Mundo Anillo*, el enigma de la nave en *Cita con Rama* — todo esto era parte de mi mobiliario mental. ¿Y dónde estaban esas maravillas? La imaginación de los escritores de SF me había mostrado cientos de universos posibles, pero mis profesores de astronomía dejaron claro que hasta ahora, cuando miramos al Universo real, podemos explicar todo lo que vemos en términos de las frías ecuaciones de la física. En pocas palabras, el Universo parece muerto. La pregunta Fermi: ¿dónde están todos? Cuanto más lo pensaba, más significativa me parecía la paradoja.

* * *

Me pareció que la paradoja era una competencia entre dos grandes números: el vasto número de sitios potenciales para la vida versus la vasta edad del Universo.

El primer número es simplemente el número de planetas con ambientes adecuados para el desarrollo de la vida. Si adoptamos el Principio de Mediocridad, y asumimos que no hay nada especial en la Tierra, entonces se deduce que hay muchos millones de ambientes adecuados para la vida en la Galaxia (y muchos miles de millones de ambientes en el Universo). Dada la gran cantidad de terrenos potenciales para sembrar, la vida debería ser común.

El segundo número es simplemente la edad del Universo: las últimas mediciones sugieren que tiene algo más de 13 mil millones de años. Para evocar un sentimiento para un lapso de tiempo tan largo, es usual en estas discusiones comprimir toda la historia del Universo en una duración o intervalo estándar. En este caso, comprimiré la edad actual del Universo en un año terrestre estándar: en otras palabras, el "Año Universal" comprime toda la historia del Universo en 365 días. En esta escala de tiempo, un segundo de tiempo real corresponde a 400 años; en otras palabras, en el Año Universal, la ciencia occidental comienza alrededor de 1 segundo antes de la medianoche del 31 de diciembre. Toda la historia de nuestra especie está a menos de una hora del Año Universal. Sin embargo, las primeras CETs podrían haberse originado en los primeros meses de verano del Año Universal (Hemisferio Norte). Si la colonización de la galaxia puede tener lugar en el equivalente de unas pocas horas, entonces uno esperaría que una o más de las civilizaciones tecnológicas avanzadas hayan completado el trabajo hace mucho tiempo. Al menos, si realmente estuvieran tan lejos de nosotros, uno esperaría ver u oír alguna evidencia de su presencia. Pero el Universo es silencioso. La paradoja de Fermi puede que no pruebe lógicamente que los alienígenas no existen, pero seguramente es un problema que exige una solución.

Tiempo "Real"	Año Universal
50 años	0.125 días
100 años	0.25 días
400 años	1 día

1:00	1.500 años
3:00	3.000 años
12:00	25.000 años
1 min 00 s	2 millones de años
4 min 00 s	8 millones de años
1 h 23 min 20 s	2 mil millones de años
6 h 55 min 40 s	13 mil millones de años
1 día 21 h 26 min 40 s	26 mil millones de años

TABLA 1 En el "Año Universal", comprimimos 13 mil millones de años en 365 días.

No fui el único que encontró interesante la paradoja de Fermi. A lo largo de los años, muchas personas han ofrecido sus resoluciones a la paradoja, y yo desarrollé el hábito de coleccionarlas. Aunque hay una fascinante gama de respuestas a la pregunta "¿dónde están todos?

Primero, hay respuestas basadas en la idea de que de alguna manera los extraterrestres están (o han estado) aquí. Esta es probablemente la resolución más popular de la paradoja. Ciertamente, la creencia en la vida extraterrestre inteligente está muy extendida. En una encuesta realizada por CNN en Internet el 1 de julio de 2000, de las 6.399 personas que votaron, el 82% pensaba que había vida inteligente en otras partes del Universo. En el solsticio de verano de 2001, el 94% de los 94.319 que respondieron a una encuesta de SETI@home creen que existe vida fuera de la Tierra. Varias encuestas sugieren que la mayoría de la población estadounidense cree que existen platillos voladores y están aquí; la proporción de creyentes parece ser menor entre los europeos, pero sin embargo es alta.

En segundo lugar, hay respuestas que sugieren que existen CET, pero por alguna razón todavía no hemos encontrado pruebas de su existencia. Esta es probablemente la categoría de respuesta más popular entre los científicos en ejercicio.

Tercero, hay respuestas que pretenden explicar por qué la humanidad está sola en el Universo, o al menos en la Galaxia; no escuchamos de la inteligencia extraterrestre porque no hay inteligencia extraterrestre.

El propósito de este libro es presentar y discutir 50 soluciones propuestas a la pregunta de Fermi. La lista no pretende ser exhaustiva, sino que las he elegido porque son representativas (y también porque me parecen especialmente interesantes). Las soluciones propuestas provienen de científicos que trabajan en varios campos de la ciencia ampliamente separados, pero también de autores del SF; en este tema, los autores han sido al menos tan industriosos como los científicos, y en muchos casos han anticipado el trabajo de los científicos.

El esquema del libro es el siguiente:

El capítulo 2 da una breve biografía de Fermi, centrada en sus logros científicos; luego discuto la noción de paradoja y presento una breve discusión de la historia de la paradoja de Fermi.

Los capítulos 3-5 presentan 49 de mis soluciones favoritas a la paradoja; no todas son independientes, y a veces revisito una solución de otra manera,

pero todas han sido seriamente propuestas como respuesta a la pregunta de Fermi. Ordeno las respuestas de acuerdo a las tres clases mencionadas anteriormente: El Capítulo 3 contiene respuestas basadas en la idea de que las CETs están aquí; el Capítulo 4 contiene respuestas basadas en la idea de que las CETs existen, pero aún no hemos encontrado evidencia de ellas; el Capítulo 5 contiene respuestas basadas en la idea de que estamos solos. Hay una lógica en el arreglo de las soluciones, pero espero que las discusiones sean lo suficientemente autónomas como para permitir a los lectores "sumergirse" en el libro y escoger las soluciones que les interesan particularmente. En las discusiones trataré de ser lo más imparcial posible, aunque no esté de acuerdo con la solución (lo cual hago a menudo).

El capítulo 6 contiene la 50ª solución: mi opinión sobre la resolución de la paradoja. No es una sugerencia original, pero resume lo que siento que la paradoja de Fermi puede decirnos sobre el Universo en el que vivimos.

Dado que el material de este libro abarca una amplia gama de temas, desde la astronomía hasta la zoología, y dado que el espacio para los debates es necesariamente limitado (se calcula en una media de unas 5 páginas por solución), también he dado una amplia lista de referencias. Las referencias propiamente dichas, a las que se hace referencia mediante números entre corchetes, figuran en el capítulo 7. Abarcan desde historias del SF hasta artículos de investigación primaria en revistas académicas. Muchos lectores pueden tener dificultades para acceder a las referencias más especializadas, pero espero que al menos encuentren la posibilidad de usar estas referencias para ayudar a encontrar información relacionada en la Web.

El libro está dirigido específicamente a un público popular. Una de las bellezas de la paradoja de Fermi es que puede ser apreciada sin la necesidad de ninguna matemática más allá de la comprensión de la notación exponencial.[3] De ello se deduce que cualquiera puede presentar una resolución de la paradoja de Fermi; no es necesario tener años de formación científica y matemática para contribuir al debate. (De hecho, como señalé anteriormente, muchas de las mejores ideas han venido de escritores de SF en lugar de científicos. Espero que un lector de este libro pueda idear una solución en la que nadie más haya pensado. Si lo hace — ¡por favor escríbame y compártalo!

2

De Fermi y la paradoja

Antes de examinar las diversas soluciones propuestas a la paradoja de Fermi, este capítulo presenta algunos de los antecedentes. Primero doy una breve biografía del propio Enrico Fermi, centrándome sólo en algunos de sus logros científicos (a los que me referiré en secciones posteriores del libro). Sin embargo, Fermi llevó una vida interesante fuera de la ciencia, y recomiendo al lector interesado las biografías de Fermi enumeradas en las nota al pie. Luego discuto la noción de paradoja, y miro brevemente algunos ejemplos de varios campos. La paradoja ha jugado un papel importante en la historia intelectual, ayudando a los pensadores a ampliar su marco conceptual y a veces forzándolos a aceptar nociones bastante contrarias a la intuición. Es interesante comparar la paradoja de Fermi con estas paradojas más establecidas. Finalmente, discuto cómo el nombre de Fermi llegó a estar vinculado a una paradoja que es más antigua de lo que mucha gente cree.

ENRICO FERMI

No es bueno tratar de impedir que el conocimiento avance. La ignorancia nunca es mejor que el conocimiento.
Enrico Fermi

Enrico Fermi fue el físico más completo del siglo pasado, un teórico de talla mundial que realizó trabajos experimentales de primer orden. Ningún otro físico desde Fermi ha cambiado de teoría a experimento con tanta facilidad, y es poco probable que alguien lo haga de nuevo. El campo se ha vuelto demasiado grande para permitir tal cruce.

Fermi nació en Roma el 29 de septiembre de 1901, tercer hijo de Alberto Fermi, funcionario, e Ida DeGattis, maestra de escuela. Demostró una habilidad precoz en matemáticas,[4] y como estudiante universitario de física en la Scuola Normale Superiore de Pisa, rápidamente superó a sus maestros.[5]

Su primera gran contribución a la física fue un análisis del comportamiento de ciertas partículas fundamentales que componen la materia. (Estas partículas — tales como protones, neutrones y electrones — son ahora llamadas fermiones en su honor. Fermi demostró que, cuando la materia se comprime de tal manera que los fermiones idénticos se acercan, entra en juego una fuerza repulsiva que resiste una mayor compresión. Esta repulsión fermiónica juega un papel importante en nuestra comprensión de fenómenos tan diversos como la conductividad térmica de los metales y la estabilidad de las estrellas

enanas blancas.

Poco después, la teoría de Fermi de la decadencia beta (un tipo de radioactividad en la que un núcleo masivo emite un electrón) cimentó su reputación internacional. Su teoría exigía que una partícula fantasmal fuera emitida junto con el electrón, una partícula a la que llamaba el neutrino — "pequeño neutro". No todos creían en la existencia de este hipotético fermión, pero se demostró que Fermi tenía razón. Los físicos finalmente detectaron el neutrino en 1956. Aunque el neutrino permanece bastante fantasmal en su renuencia a reaccionar con la materia normal, sus propiedades juegan un papel profundo en las teorías astronómicas y cosmológicas actuales.

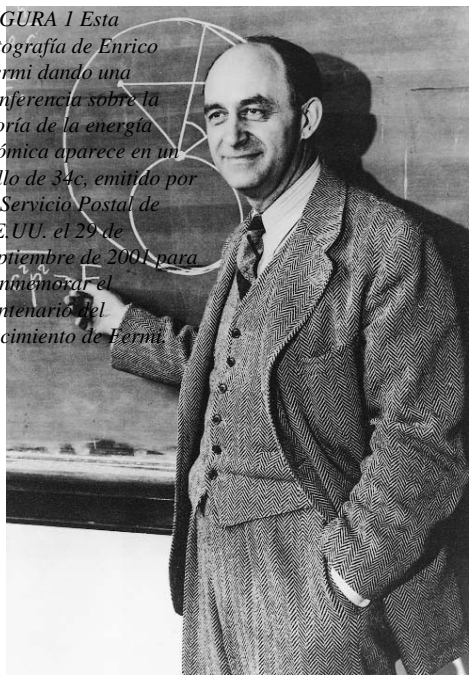


FIGURA 1 Esta fotografía de Enrico Fermi dando una conferencia sobre la teoría de la energía atómica aparece en un sello de 34c, emitido por el Servicio Postal de EE.UU. el 29 de septiembre de 2001 para conmemorar el centenario del nacimiento de Fermi.

En 1938, Fermi ganó el Premio Nobel de Física. El premio fue en parte un reconocimiento a una técnica que desarrolló para sondear el núcleo atómico. Su técnica lo llevó al descubrimiento de nuevos elementos radiactivos; al bombardear los elementos naturales con neutrones, produjo más de 40 radioisótopos artificiales. El premio también reconoció su descubrimiento de cómo hacer que los neutrones se muevan lentamente. Esto puede parecer un descubrimiento menor, pero tiene profundas aplicaciones prácticas, ya que los neutrones de movimiento lento son más efectivos que los neutrones rápidos para inducir la radioactividad. (Un neutrón lento pasa más tiempo en la vecindad de un núcleo objetivo, y por lo tanto es más probable que interactúe con el núcleo. De manera similar, una pelota de golf bien dirigida es más probable que se hunda en el hoyo si se está moviendo lentamente: un putt de movimiento rápido puede pasar. Este principio se utiliza en el funcionamiento de los reactores nucleares.

La noticia del premio se vio atenuada por el empeoramiento de la situación política en Italia. Mussolini, cada vez más influenciado por Hitler, inició una campaña antisemita. El gobierno fascista de Italia aprobó leyes que fueron copiadas directamente de los edictos nazis de Nüremberg. Las leyes no afectaban directamente a Fermi ni a sus dos hijos, que eran considerados arios, pero la esposa de Fermi, Laura, era judía. Decidieron dejar Italia, y Fermi aceptó un puesto en América.

Dos semanas después de llegar a Nueva York, llegó a Fermi la noticia de que científicos alemanes y austriacos habían demostrado la fisión nuclear. Einstein, después de algunos impulsos, escribió su histórica carta a Roosevelt alertando al Presidente sobre las probables consecuencias de la fisión nuclear. Citando el trabajo de Fermi y sus colegas, Einstein, advirtiço que una reacción nuclear en cadena se podría establecer en una gran masa de uranio — una reacción que podría conducir a la liberación de grandes cantidades de energía. Roosevelt estaba lo suficientemente preocupado como para financiar un programa de investigación sobre las posibilidades de defensa. Fermi estaba profundamente involucrada en el programa. Los físicos tenían muchas preguntas que responder antes de poder construir una bomba, y fue Fermi quien respondió a muchas de ellas. El 2 de diciembre de 1942, en un laboratorio improvisado construido en una cancha de squash bajo las gradas oeste del estadio de la Universidad de Chicago, el grupo de Fermi logró con éxito la primera reacción nuclear autosostenible. El reactor, o pila, consistía en baldosas de uranio purificado —unas 6 toneladas en total— dispuestas dentro de una matriz de grafito. El grafito ralentizó los neutrones, permitiéndoles causar una mayor fisión y mantener la reacción en cadena. Las barras de control hechas de cadmio (un fuerte absorbedor de neutrones) controlaban la velocidad de la reacción en cadena. La pila se volvió crítica a las 2:20 P.M., y la primera prueba se realizó durante 28 minutos.[6]

Fermi, con su inigualable conocimiento de la física nuclear, jugó un papel importante en el Proyecto Manhattan. Estuvo allí en el desierto de Alamogordo el 15 de julio de 1945, a 9 millas de la zona cero en la prueba de la Trinidad. Se recostó en el suelo mirando en la dirección opuesta a la bomba. Cuando vio el destello de la inmensa explosión, se puso en pie y dejó caer pequeños trozos de papel de su mano. En el aire quieto los pedazos de papel habrían caído a sus pies; pero cuando llegó la onda de choque, unos segundos después del destello, el papel se movió horizontalmente debido al desplazamiento del aire. De manera típica, medía el desplazamiento del papel; como conocía la distancia a la fuente, podía estimar inmediatamente la energía de la explosión.

Después de la guerra, Fermi volvió a la vida académica en la Universidad de Chicago y se interesó por la naturaleza y el origen de los rayos cósmicos.

En 1954, sin embargo, le diagnosticaron cáncer de estómago. Emilio Segre, amigo y colega de toda la vida de Fermi, lo visitó en el hospital. Fermi estaba descansando después de una operación exploratoria, y estaba siendo

alimentado por vía intravenosa. Incluso al final, según el conmovedor relato de Segre, Fermi mantuvo su amor por la observación y el cálculo: medía el flujo del nutriente contando las gotas y cronometrándolas con un cronómetro.

Fermi murió el 29 de noviembre de 1954, a la temprana edad de 53 años.

Preguntas de Fermi

Los colegas de Fermi lo valoran por su extraña habilidad para ver directamente al corazón de un problema físico y describirlo en términos simples. Lo llamaban el Papa, porque parecía infalible. Casi tan impresionante fue la forma en que calculó la magnitud de una respuesta (a menudo haciendo cálculos complejos en su cabeza). Fermi trató de inculcar esta instalación en sus estudiantes. Les exigía, sin previo aviso, respuestas a preguntas aparentemente sin respuesta. ¿Cuántos granos de arena hay en las playas del mundo? ¿Hasta dónde puede volar un cuervo sin detenerse? ¿Cuántos átomos del último aliento de César inhalas con cada pulmón lleno de aire? Tales "preguntas Fermi" (como se las conoce ahora) requerían que los estudiantes se basaran en su comprensión del mundo y su experiencia diaria y que hicieran aproximaciones aproximadas, en lugar de basarse en libros o conocimientos previos.

La pregunta arquetípica de Fermi es la que hizo a sus estudiantes estadounidenses: "¿Cuántos afinadores de piano hay en Chicago?" Podemos derivar una estimación informada, a diferencia de una conjetura no informada, razonando de la siguiente manera. Primero, supongamos que Chicago tiene una población de 3 millones de personas. (No he revisado un almanaque para ver si esto es correcto; pero hacer estimaciones explícitas en ausencia de cierto conocimiento es el objetivo del ejercicio. Chicago es una gran ciudad, pero no la más grande de Estados Unidos, por lo que podemos estar seguros de que es improbable que la estimación sea errónea por más de un factor de 2. Puesto que hemos declarado explícitamente nuestra suposición, podemos revisar el cálculo en una fecha posterior y revisar la respuesta a la luz de datos mejorados. En segundo lugar, asumir que las familias, más que los individuos, poseen pianos e ignoran aquellos pianos que pertenecen a instituciones como escuelas, universidades y orquestas. Tercero, si asumimos que una familia típica contiene 5 miembros, entonces nuestro estimado es que hay 600,000 familias en Chicago. Sabemos que no todas las familias poseen un piano; nuestra cuarta suposición es que 1 de cada 20 familias posee un piano. Por lo tanto, estimamos que hay 30.000 pianos en Chicago. Ahora haz la pregunta: ¿Cuántas afinaciones necesitarían 30.000 pianos en un año? Nuestra quinta suposición es que un piano típico requerirá afinación una vez al año — así que 30.000 afinaciones de piano tienen lugar en Chicago cada año. Asunción seis: Un afinador de pianos puede afinar 2 pianos por día y trabaja 200 días al año. Por lo tanto, un afinador individual afina 400 instrumentos en un año. Para acomodar el número total de afinaciones requeridas, Chicago debe ser el

hogar de 30,000/400 = 75 afinadores de piano. Queremos una estimación, no una cifra precisa, así que finalmente redondeamos este número a 100.

Como veremos más adelante, la capacidad de Fermi para comprender lo esencial de un problema se manifestó cuando planteó la pregunta: "¿Dónde están todos?"

PARADOJA

Estas son viejas paradojas, para hacer reír a los tontos en la cervecería.

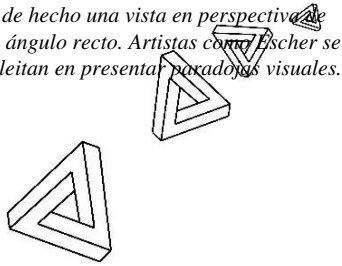
William Shakespeare,
Otelo, Acto II, Escena I

Nuestra palabra paradoja proviene de dos palabras griegas: *para*, que significa "contrario a", y *doxa*, que significa "opinión".[7] Describe una situación en la que, junto a una opinión o interpretación, hay otra opinión mutuamente excluyente. La palabra ha tomado una variedad de significados sutilmente diferentes, pero en el centro de cada uso está la idea de una contradicción. Sin embargo, la paradoja es más que una mera inconsistencia. Si dices "está lloviendo, no está lloviendo", entonces te has contradecido, pero la paradoja es más que eso. Una paradoja surge cuando se comienza con un conjunto de premisas evidentes y luego, a partir de estas premisas, se deduce una conclusión que las socava. Si usted tiene un argumento de hierro fundido que prueba que ciertamente está lloviendo afuera, y luego mira por la ventana y ve que no está lloviendo, entonces tiene una paradoja que resolver.

Una paradoja o falacia débil a menudo puede ser aclarada con un poco de pensamiento. La contradicción suele surgir debido a un simple error en una cadena de lógica que va desde las premisas hasta la conclusión.[8] Sin embargo, en una fuerte paradoja, la fuente de la contradicción no es aparente inmediatamente; pueden pasar siglos antes de que las cosas se resuelvan. Una fuerte paradoja tiene el poder de desafiar nuestras teorías y creencias más preciadas. De hecho, como el matemático Anatol Rapoport comentó una vez: "Las paradojas han desempeñado un papel dramático en la historia intelectual, a menudo prefigurando desarrollos revolucionarios en la ciencia, las matemáticas y la lógica. Siempre que, en cualquier disciplina, descubrimos un problema que no puede ser resuelto dentro del marco conceptual que supuestamente debería aplicarse, experimentamos conmoción. La conmoción puede obligarnos a descartar el viejo marco y adoptar uno nuevo".[9]

FIGURA 2 Una paradoja visual. Estas figuras imposibles son triángulos de Penrose. Parecen mostrar un sólido triangular tridimensional, pero estos triángulos son imposibles de construir. Cada vértice de un triángulo de Penrose

es de hecho una vista en perspectiva de un ángulo recto. Artistas como Escher se deleitan en presentar paradojas visuales.



Las paradojas abundan en lógica, matemáticas y física, y hay un tipo para cada gusto e interés.

Algunas paradojas lógicas

Una vieja paradoja, contemplada por los filósofos desde mediados del siglo IV a.C. y todavía muy discutida, es la paradoja mentirosa. Su atribución más antigua es a Eubulides de Mileto, que preguntó: "Un hombre dice que miente; ¿es lo que dice verdadero o falso?" Por más que se analice la sentencia, hay una contradicción. La misma paradoja aparece en el Nuevo Testamento. San Pablo, refiriéndose a los cretenses, escribió: "Uno de ellos, incluso un profeta, dijo que los cretenses son siempre mentirosos".[10] No está claro si San Pablo fue consciente del problema en su sentencia, pero cuando se permite la auto-referencia la paradoja parece casi inevitable.

Una de las herramientas de razonamiento más importantes que poseemos son los sorites. En el lenguaje lógico, un sorites es una cadena de silogismos enlazados: el predicado de una afirmación se convierte en el tema de la siguiente afirmación. El siguiente es un ejemplo típico:

todos los cuervos son pájaros;
todos los pájaros son animales;
todos los animales necesitan agua para sobrevivir.

Siguiendo la cadena, llegamos a una conclusión lógica: todos los cuervos necesitan agua.

Los sorites son importantes porque nos permiten sacar conclusiones sin cubrir todas las eventualidades en un experimento. (Así que no necesitamos privar a los cuervos de agua para saber que pueden morir de sed.) Pero a veces la conclusión de un soritos puede ser absurda: tenemos una paradoja soritos. Por ejemplo, si aceptamos que añadir un grano de arena a otro grano de arena no constituye un montón de arena, y dado que un solo grano no constituye en sí mismo un montón, entonces debemos concluir que ninguna cantidad de arena puede hacer un montón. Y sin embargo vemos montones de arena. La fuente de tales paradojas radica en la vaguedad intencional de una palabra como "montón"; los políticos, por supuesto, se aprovechan rutinariamente de estos trucos lingüísticos.[11]

Al igual que los soritos, al razonar todos empleamos rutinariamente la

inducción — el dibujo de generalizaciones de casos específicos. Por ejemplo, siempre que vemos algo caer, cae *hacia abajo*: usando la inducción proponemos una ley general, a saber, que cuando las cosas caen *siempre* caen hacia abajo y nunca hacia arriba. La inducción es una técnica tan útil que cualquier cosa que la ponga en duda es preocupante. Considere la paradoja del cuervo de Hempel.[12] Suponga que un ornitólogo, después de años de observación de campo, ha observado cientos de cuervos negros. La evidencia es suficiente para sugerir la hipótesis de que "todos los cuervos son negros". Este es el proceso estándar de inducción científica. Cada vez que el ornitólogo ve un cuervo negro es una pequeña prueba a favor de su hipótesis. Ahora, la afirmación de que "todos los cuervos son negros" es lógicamente equivalente a la afirmación de que "todas las cosas no-negras son no-cuervos". Si la ornitóloga ve un trozo de tiza blanca, entonces la observación es una pequeña prueba a favor de la hipótesis de que "todas las cosas que no son negras son no-cuervos" — pero por lo tanto debe ser una prueba para su afirmación de que los cuervos son negros. ¿Por qué una observación con respecto a la tiza debe ser evidencia de una hipótesis con respecto a las aves? ¿Significa esto que los ornitólogos pueden hacer un trabajo valioso mientras están sentados en el interior viendo la televisión, sin molestarse en ver un pájaro en el monte?

Otra paradoja de la lógica es la de la horca inesperada, en la que un juez le dice a un condenado: "Te ahorcarán un día de la semana que viene, pero, para ahorrarte la agonía mental, el día que la sentencia se lleve a cabo será una sorpresa." El preso razona que el verdugo no puede esperar hasta el viernes para cumplir la orden del juez: un retraso tan largo significa que todos sabrán que la ejecución tiene lugar ese día — la ejecución no será una sorpresa. Así que el viernes está fuera. Pero si se descarta el viernes, el jueves se descarta por la misma lógica. Igual que el miércoles, martes y lunes. El prisionero, poderosamente aliviado, razona que la sentencia no puede tener lugar. Sin embargo, ¡está completamente sorprendido ya que es llevado a la horca el jueves! Este argumento —que también recibe el nombre de "paradoja del examen sorpresa" y "paradoja de la predicción"— ha generado una enorme literatura. [13]

Unas pocas Paradojas Científicas

Aunque a menudo es divertido, y ocasionalmente útil, ponderar a los mentirosos, cuervos y ahorcados, los argumentos que involucran paradojas lógicas con demasiada frecuencia —al menos para mi gusto— degeneran en una discusión sobre el significado preciso y el uso de las palabras. Tales discusiones pueden estar bien si uno es un filósofo. Pero por mi dinero las paradojas realmente fascinantes son las que se pueden encontrar en la ciencia.

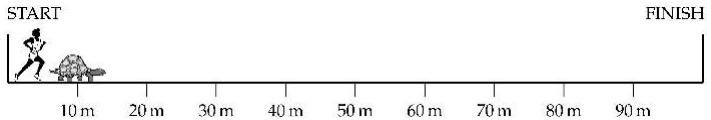


FIGURA 3 Cuando la carrera comienza, Aquiles está 10m detrás de la tortuga. Para cuando Aquiles ha corrido 10m, la tortuga se ha arrastrado una distancia de 1m. Para cuando Aquiles ha corrido un metro más, la tortuga ha gateado otros 10 cm. Siguiendo esta lógica, parece que Aquiles nunca podrá ponerse al día.....

Considere una de las más antiguas de todas las paradojas: La paradoja de Zenón de Aquiles y la tortuga.[14] Aquiles y la tortuga participan en una carrera de 100 metros. Como Aquiles corre 10 veces más rápido que la tortuga, le da al animal una ventaja de 10 m. Los dos velocistas parten en el mismo instante; así que cuando Aquiles ha cubierto los primeros 10 m, la tortuga se ha movido 1 m. En el tiempo que le toma a Aquiles cubrir 1 m, la tortuga se ha movido 10 cm; en el tiempo que le toma a Aquiles cubrir esos 10 cm, la tortuga se ha movido 1 cm más. Y así sucesivamente hasta el *infinito*. Nuestros sentidos nos dicen que un corredor rápido siempre adelanta a un corredor lento, pero Zenón dijo que Aquiles no puede atrapar a la tortuga. Hay una contradicción entre lógica y experiencia: hay una paradoja. La paradoja tardó 2.000 años en resolverse, pero la maquinaria matemática para hacerlo encontró muchos otros usos[15].

La doble paradoja, que implica el fenómeno relativista especial de la dilatación del tiempo, es una de las más famosas de la física. Supongamos que un gemelo se queda en casa mientras que el otro viaja a una estrella distante a una velocidad cercana a la de la luz. Para el gemelo que se queda en casa, el reloj de su hermano corre despacio: su gemelo envejece más despacio que él. Aunque este fenómeno puede ser contrario al sentido común, es un hecho comprobado experimentalmente. ¿Pero seguramente la relatividad nos dice que el gemelo viajero puede considerarse en reposo? Desde su punto de vista, el reloj del gemelo terrícola corre lento; el gemelo que se queda en casa debe ser el que envejece lentamente. Entonces, ¿qué sucede cuando el viajero regresa? No pueden tener razón los dos: ¡es imposible que ambos gemelos sean más jóvenes el uno del otro! La resolución de esta paradoja es fácil: la confusión surge de una simple aplicación errónea de la relatividad. Las situaciones de los gemelos no son intercambiables: el gemelo viajero acelera a la velocidad de la luz, desacelera en el punto medio de su viaje, y lo hace todo de nuevo en el viaje de regreso. Ambos gemelos coinciden en que el gemelo que se queda en casa no sufre tal aceleración. Así que el viajero envejece más lentamente que el gemelo terrenal; regresa y encuentra a su hermano envejecido, o incluso muerto. Un visitante extraterrestre a la Tierra observaría el mismo fenómeno cuando regresara a su planeta natal: sus hermanos que se quedan en casa (si los alienígenas tienen hermanos) serían mayores o estarían muertos hace mucho tiempo. Es un hecho triste de los viajes interestelares, y es contrario a nuestra experiencia, pero no es una paradoja.[16]

Una de las paradojas científicas más importantes es la que lleva el nombre

de Heinrich Olbers.[17] Consideró una pregunta formulada por innumerables niños: "¿Por qué está oscuro el cielo nocturno?" y mostró que la oscuridad de la noche es profundamente misteriosa. Su razonamiento se basaba en dos premisas. Primero, que el Universo es infinito en extensión. Segundo, que las estrellas están esparcidas al azar por todo el Universo. (Olbers no sabía de la existencia de galaxias — no fueron reconocidas como agrupaciones estelares hasta unos 75 años después de su muerte — pero esto no afecta su razonamiento. Su argumento funciona exactamente de la misma manera para las galaxias que para las estrellas. Desde estas premisas llegamos a una conclusión incómoda: en cualquier dirección en la que mires, tu línea de visión debe terminar eventualmente en una estrella — por lo tanto, el cielo nocturno debe ser brillante.

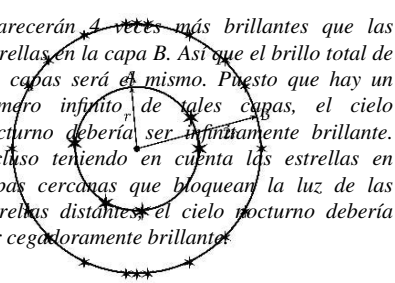
La paradoja de Olbers

Supongamos que todas las estrellas tienen el mismo brillo intrínseco. (El siguiente argumento es más simple bajo este supuesto, pero la conclusión de ninguna manera depende de él. Ahora consideremos una delgada capa de estrellas (llámala capa A) con la Tierra en su centro, y otra delgada capa de estrellas (capa B), también centrada en la Tierra, con un radio dos veces mayor que el de la capa A. En otras palabras, la capa B está dos veces más distante de nosotros que la capa A.

Una estrella en la cáscara B parecerá ser 1/4 tan brillante como una estrella en la capa A. (Esta es la ley del cuadrado inverso: si la distancia a una fuente de luz *aumenta* por un factor de 2, el brillo aparente de la fuente de luz *disminuye* por un factor de $2 \times 2 = 4$.) Por otro lado, la superficie de la capa B es 4 veces mayor que la de la capa A, por lo que contiene 4 veces más estrellas. Cuatro veces más estrellas, cada una de las cuales es 1/4 de brillante: ¡el brillo total de la capa B es exactamente el mismo que el brillo total de la capa A! Pero esto funciona para dos capas de estrellas cualesquiera. La contribución al brillo del cielo nocturno de una lejana capa de estrellas es la misma que la de una capa cercana. Si el Universo es infinito en extensión, entonces el cielo nocturno debería ser infinitamente brillante.

Este argumento no es del todo correcto: la luz de una estrella extremadamente distante será interceptada por una estrella intermedia. Sin embargo, en un Universo infinito con una distribución uniforme de estrellas, cualquier línea de visión se topará con una estrella. Lejos de ser oscuro, todo el cielo nocturno debería ser tan deslumbrante como el Sol. ¡El cielo nocturno debería cegarnos con su brillo!

FIGURA 4 Si las estrellas están distribuidas uniformemente en el espacio, entonces la capa B contendrá 4 veces más estrellas que la capa A (A está a una distancia r y B está a una distancia 2r). Pero las estrellas en la capa A



aparecerán 4 veces más brillantes que las estrellas en la capa B. Así que el brillo total de las capas será el mismo. Puesto que hay un número infinito de tales capas, el cielo nocturno debería ser infinitamente brillante. Incluso teniendo en cuenta las estrellas en capas cercanas que bloquean la luz de las estrellas distantes, el cielo nocturno debería ser cegadoramente brillante.

¿Cómo podemos resolver la paradoja? La primera explicación en la que es probable que pienses, es que las nubes de gas o polvo oscurecen la luz de las estrellas distantes. El Universo contiene nubes de polvo y regiones gaseosas, pero no pueden protegernos de la paradoja de Olbers: si las nubes absorben la luz, se calentarán hasta que estén a la misma temperatura media que las propias estrellas. Resulta que la paradoja se explica por uno de los descubrimientos más dramáticos realizados por los astrónomos: el Universo tiene una edad finita. Ya que el Universo tiene solo 13 mil millones de años, la parte que podemos ver es solo de 13 mil millones de años luz de tamaño. Para que el cielo nocturno sea tan brillante como la superficie del Sol, el Universo observable tendría que ser casi 1 millón de veces más grande de lo que es. (El hecho de que el Universo se esté expandiendo también ayuda a explicar la paradoja: la luz de los objetos distantes es corrida al rojo por la expansión, por lo que los objetos distantes son menos brillantes de lo que uno esperaría de la ley del cuadrado inverso. La explicación principal, sin embargo, viene de la edad finita del Universo.)

Es fascinante que al reflexionar sobre una pregunta tan simple — "¿Por qué está oscuro el cielo nocturno?" Se podría inferir que el Universo se está expandiendo y que tiene una edad finita (o al menos las estrellas y galaxias que contiene). Tal vez la simple pregunta que hizo Fermi — "¿Dónde están todos?" lleva a una conclusión aún más importante.

LA PARADOJA DE FERMI

A veces pienso que estamos solos. A veces pienso que no lo somos. En cualquier caso, el pensamiento es asombroso.

Buckminster Fuller

Gracias al trabajo detectivesco del físico de Los Álamos Eric Jones, en cuyo informe me baso en gran medida en esta sección, conocemos la génesis de la paradoja de Fermi.[18]

* * *

La primavera y el verano de 1950 vieron a los periódicos neoyorquinos ejercitarse sobre un misterio menor: la desaparición de los basureros públicos.

Este año también fue la altura de los informes de platillos voladores, otro tema que llenó la columna de pulgadas. El 20 de mayo de 1950, The New Yorker publicó una caricatura de Alan Dunn que hacía referencia divertida a ambas historias.

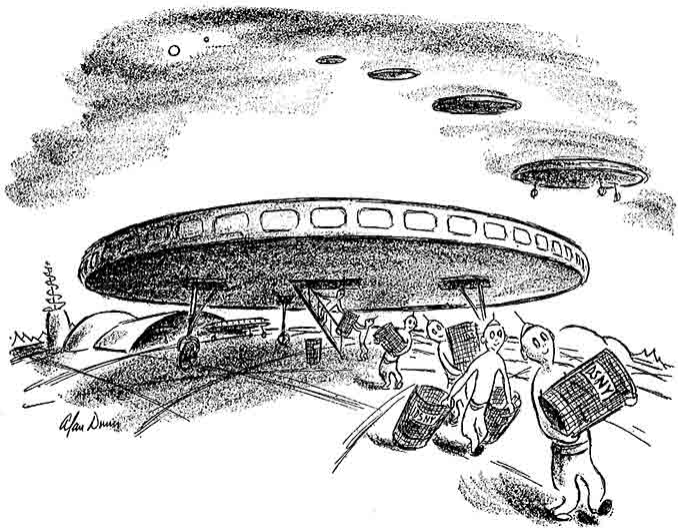


FIGURA 5 Por razones que sólo tienen sentido para ellos, los extraterrestres están regresando a su planeta natal con botes de basura que son propiedad del Departamento de Sanidad de Nueva York.

Fermi estuvo en Los Álamos en el verano de 1950. Un día, estaba charlando con Edward Teller y Herbert York mientras caminaban hacia el Fuller Lodge para almorzar. Su tema fue la reciente oleada de observaciones de platillos voladores. Emil Konopinski se unió a ellos y les habló de la caricatura de Dunn. Fermi comentó irónicamente que la de Dunn era una teoría razonable porque explicaba dos fenómenos distintos: la desaparición de los botes de basura y los reportes de platillos voladores. Después de la broma de Fermi, siguió una seria discusión sobre si los platillos voladores podían exceder la velocidad de la luz. Fermi le preguntó a Teller cuál creía que era la probabilidad de obtener pruebas de viajes superlumínicos para 1960. Fermi dijo que la estimación de uno en un millón de Teller era demasiado baja; Fermi pensó que era más bien uno en diez.

FIGURA 6 Edward Teller (izq.) con Fermi en 1951, poco después de que Fermi hiciera su primera pregunta.

Los cuatro se sentaron a almorzar y la discusión se centró en temas más mundanos. Entonces, en medio de la conversación y de repente, Fermi preguntó: "¿Dónde están todos?" Sus compañeros de almuerzo Teller, York y Konopinski comprendieron inmediatamente que estaba hablando de visitantes extraterrestres. Y como se trataba de Fermi, quizás se dieron cuenta de que era una cuestión más preocupante y profunda de lo que parece a primera vista. York recuerda que Fermi hizo una serie de cálculos rápidos y concluyó que deberíamos haber sido visitados hace mucho tiempo y muchas veces.

Aunque ni Fermi ni los demás han publicado nunca ninguno de estos cálculos, podemos hacer una estimación razonable de sus procesos de pensamiento. Primero debe haber hecho una estimación del número de CETs en la Galaxia, y esto es algo que podemos estimar nosotros mismos. Después de todo, la pregunta "¡Cuántas avanzadas civilizaciones extraterrestres comunicantes hay en la galaxia!

Una pregunta de Fermi: ¿Cuántas civilizaciones comunicantes existen?

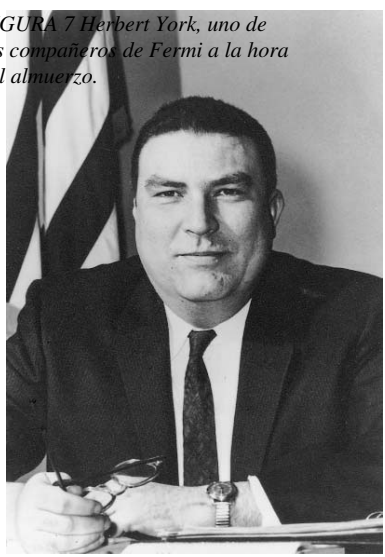
Representa el número de CETs comunicantes en la Galaxia por el símbolo N. Para estimar N primero necesitamos saber la tasa anual R a la que se forman las estrellas en la Galaxia. También necesitamos saber la fracción f_p de estrellas que poseen planetas y, para las estrellas portadoras de planetas, el número n_e de planetas con ambientes adecuados para la vida. También necesitamos la fracción f_l de planetas adecuados en los que la vida se desarrolla realmente; la fracción fi de estos planetas en los que la vida desarrolla inteligencia; y la fracción f_c de formas de vida inteligentes que desarrollan una cultura capaz de comunicación interestelar. Finalmente, necesitamos saber el tiempo que L, en años, tal cultura dedicará a la comunicación. Multiplicando todos estos factores juntos nos dará una

estimación de *N*. Podemos escribirlo como una ecuación simple:

$$N = R \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$$

La ecuación $N = R \times f_p \times n_e \times f_l \times f_i \times f_c \times L$ no es más una ecuación "apropiada" para el número de CETs comunicantes que $N = p_c \times n_f \times f_p \times n_t \times$ R es la ecuación para el número de afinadores de piano en Chicago. Pero si asignamos valores razonables a los diversos factores de la ecuación —siempre con el entendimiento de que tales valores pueden cambiar y cambiarán a medida que nuestro conocimiento aumente— llegaremos a una estimación del número de CETs en la galaxia. La dificultad que enfrentamos está en nuestros diversos grados de ignorancia de los diversos términos de la ecuación. Cuando se les pide que proporcionen valores para estos términos, los astrónomos darían respuestas que van desde "Estamos razonablemente seguros" (para el factor *R*) hasta "Estamos cerca de precisarlo" (para el factor f_p) hasta "¿Cómo diablos deberíamos saberlo? (para el factor *L*). Al menos cuando tratamos de estimar el número de afinadores de pianos con base en Chicago, podemos estar razonablemente seguros de que nuestras diversas subestimaciones no están totalmente equivocadas; no puede haber tal confianza con nuestra estimación del número de CETs comunicantes. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento definitivo de las CET, es nuestra única forma de proceder. (La ecuación anterior ha alcanzado un cierto estatus icónico en la ciencia; se conoce como la *ecuación de Drake*, después de que el radioastrónomo Frank Drake fuera el primero en hacer uso explícito de ella.[19]La ecuación de Drake fue el punto focal de una conferencia extremadamente influyente sobre la búsqueda de inteligencia extraterrestre, celebrada en Green Bank en 1961 — 11 años después del comentario de Fermi).

FIGURA 7 Herbert York, uno de los compañeros de Fermi a la hora del almuerzo.



En 1950, Fermi habría sabido mucho menos sobre los diversos factores de la "ecuación" anterior, pero podría haber hecho algunas conjeturas razonables, guiado, como lo habría sido, por el Principio de Mediocridad: no hay nada especial en la Tierra o en nuestro Sistema Solar. Si hubiera adivinado a un ritmo de formación estelar de 1 estrella al año no habría estado tan equivocado. Los valores de $f_p = 0{,}5$ (la mitad de las estrellas tienen planetas) y $n_e = 2$ (las estrellas con planetas en promedio cada una tiene 2 planetas con ambientes propicios para la vida) parecen ser "razonables". Los otros factores son mucho más subjetivos; si fuera optimista, Fermi podría haber elegido $f_l = 1$ (cada planeta que puede desarrollar vida desarrollará vida), $f_i = 1$ (una vez que la vida se desarrolle, la vida inteligente ciertamente le seguirá), $f_c = 0{,}1$ (1 de cada 10 formas de vida inteligentes desarrollará una civilización capaz y dispuesta a comunicarse) y $L = 10^6$ (las civilizaciones permanecen en la fase de comunicación durante aproximadamente 1 millón de años). Si hubiera argumentado así, habría llegado a la estimación $N = 10^6$. En otras palabras, podría haber un millón de civilizaciones tratando de comunicarse con nosotros.

FIGURA 8 Emil Konopinski (extremo izquierdo), otro de los compañeros de Fermi a la hora del almuerzo.

Entonces, ¿por qué no sabemos nada de algunos de ellas? De hecho, ¿por qué no están ya aquí? Si algunas de las civilizaciones son extremadamente longevas, entonces podríamos esperar que colonicen la Galaxia — y lo han hecho antes de que se desarrollara la vida multicelular en la Tierra. La galaxia debería estar plagada de civilizaciones extraterrestres. Sin embargo, no vemos ninguna señal de ellos. Ya deberíamos saber de su existencia, pero no lo sabemos. ¿Dónde están todos? *¿Dónde están ellos*? Esta es la paradoja de Fermi.

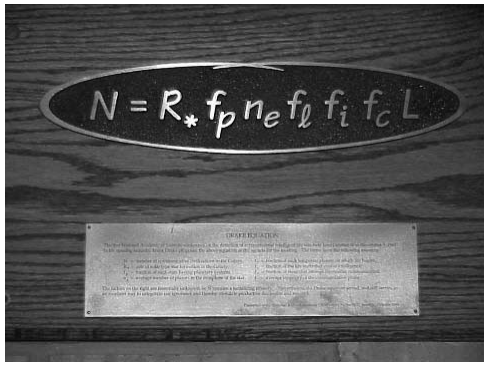


FIGURA 9 La ecuación de Drake es un medio para estimar el número de civilizaciones comunicativas en la galaxia. Drake desarrolló la ecuación para que pudiera formar parte de la agenda de la primera reunión del SETI (celebrada en NRAO Green Bank, WV, en 1961). Esta placa conmemorativa se encuentra en la misma pared que sostenía la pizarra donde la ecuación fue escrita por primera vez.

Nótese que la paradoja no es que la inteligencia extraterrestre no exista. (No sé si Fermi creía en la existencia de inteligencia extraterrestre, pero sospecho que sí.) Más bien, la paradoja es que no vemos señales de tal inteligencia cuando podríamos esperar hacerlo. Una explicación de la paradoja es, de hecho, que somos la única civilización avanzada, pero es sólo una de varias explicaciones.

* * *

Preguntar por qué no vemos evidencia de civilizaciones extraterrestres puede parecer una pregunta trivial pero, como cabría esperar de un comentario de Fermi, es un profundo rompecabezas. Podemos apreciar la fuerza de la paradoja cuando nos damos cuenta de que ha sido descubierta independientemente cuatro veces: podría llamarse más apropiadamente la paradoja Tsiolkovsky-Fermi-Viewing-Hart.

Konstantin Tsiolkovsky, un visionario científico que ya en 1903 elaboró la base teórica de los vuelos espaciales, creía profundamente en la doctrina monista de que la realidad última es enteramente de una sola sustancia. Si todas las partes del Universo fueran iguales, se deduciría que debe haber otros sistemas planetarios similares al nuestro, y que algunos de esos planetas poseerían vida.[20] Sin embargo, dado su interés por los detalles de los vuelos espaciales, Tsiolkovsky también creía firmemente que la humanidad construiría hábitats en el Sistema Solar y luego se trasladaría al espacio. Sus sentimientos se revelaron en su famosa frase: “La Tierra es la cuna de la inteligencia, pero es imposible vivir eternamente en ella”. El lado humorista en él lo impulsó a argumentar que si *nos* expandimos al espacio, entonces todas esas *otras* especies deben hacer lo mismo. La lógica es ineludible, y Tsiolkovsky era consciente de que esto conducía a una paradoja al mantener que la humanidad se expandirá al espacio *y* que el Universo está repleto de vida inteligente. En 1933, mucho antes de que Fermi hiciera su pregunta, Tsiolkovsky señaló que la gente niega la existencia de CETs porque (i) si tales

civilizaciones existieran, entonces sus representantes habrían visitado la Tierra, y (ii) si tales civilizaciones existieran, entonces nos habrían dado alguna señal de su existencia. No sólo es una declaración clara de la paradoja, sino que Tsiolkovsky ofreció una solución: creía que las inteligencias avanzadas — "seres celestiales perfectos"— consideran que la humanidad aún no está lista para una visita.[21]

Los trabajos técnicos de Tsiolkovsky sobre cohetería y vuelos espaciales fueron ampliamente discutidos, pero el resto de su producción fue generalmente ignorada en la era soviética. Una apreciación de su discusión de la paradoja, por lo tanto, no llegó hasta hace poco. (La propia contribución de Fermi no le fue mucho mejor. En su influyente libro de 1966 *Intelligent Life in the Universe*, Sagan y Shklovsky introducen un capítulo con la cita "¿Dónde están? En un artículo posterior, Sagan dice que la cita de Fermi fue "posiblemente apócrifa").

En 1975, el ingeniero inglés David Viewing planteó claramente el dilema. Una cita de su papel lo resume muy bien: "Esta es, pues, la paradoja: toda nuestra lógica, todo nuestro anti-isocentrismo, nos asegura que no somos únicos, que deben estar allí. Y sin embargo no los vemos." Viendo reconoce que Fermi fue el primero en hacer la importante pregunta — "¿Dónde están?" y que esta pregunta lleva a una paradoja. Por lo tanto, que yo sepa, este documento es el primero que se refiere directamente a la paradoja de Fermi.[22]

Sin embargo, fue un artículo de 1975 de Michael Hart en el *Quarterly Journal of the Royal Astronomical Society* lo que provocó una explosión de interés en la paradoja.[23] Hart exigió una explicación para un hecho clave: no hay seres inteligentes del espacio exterior en la Tierra en la actualidad. Sostuvo que existen cuatro categorías de explicaciones para este hecho. En primer lugar, las "explicaciones físicas", que se basan en alguna dificultad que hace que los viajes espaciales sean inviables. En segundo lugar, las "explicaciones sociológicas", que en esencia suponen que los extraterrestres han optado por no visitar la Tierra. En tercer lugar, las "explicaciones temporales", que sugieren que las CETs no han tenido tiempo de llegar a nosotros. Cuarto, hay explicaciones que argumentan que quizás han estado en la Tierra, pero no las vemos ahora. Estas categorías estaban destinadas a agotar las posibilidades. Hart entonces demostró enérgicamente cómo ninguna de estas cuatro categorías proporciona un relato convincente del hecho clave, que lo llevó a ofrecer su propia explicación: *somos la primera civilización en nuestra Galaxia.*

El documento de Hart condujo a un vigoroso debate, gran parte del cual apareció en las páginas del *Quarterly Journal*. Fue un debate en el que cualquiera pudo entrar — una de las primeras contribuciones provino de la Cámara de los Lores en Westminster.[24] Tal vez la ofrenda más controvertida vino de Frank Tipler, en un artículo con el título inflexible "Extraterrestrial Intelligent Beings Do Not Exist" (Los seres inteligentes extraterrestres no existen). Tipler razonó que las CETs avanzadas podían utilizar sondas

autorreplicadoras para explorar o colonizar la galaxia de forma económica y en un tiempo relativamente corto. El resumen del artículo de Tipler lo resume: "Se argumenta que si existen seres inteligentes extraterrestres, entonces sus naves espaciales ya deben estar presentes en nuestro Sistema Solar".[25] Tipler sostuvo que el programa SETI no tenía ninguna posibilidad de éxito, y que por lo tanto era una pérdida de tiempo y dinero. Su argumento vertió aceite sobre los fuegos del debate y condujo a una nueva ronda de argumentos. El mejor y más fresco resumen de los argumentos vino de David Brin, quien llamó a la paradoja el "gran silencio "[26].

En 1979, Ben Zuckerman y Michael Hart organizaron una conferencia para discutir la paradoja de Fermi. Las actas se publicaron en forma de libro[27] y, aunque el volumen contiene una variedad de opiniones, es difícil leerlo sin llegar a la conclusión de que las CET tienen los medios, el motivo y la oportunidad de colonizar la galaxia. El medio: los viajes interestelares parecen ser posibles, si no fáciles. El motivo: Zuckerman mostró cómo algunas CETs se verían forzados a viajar interestelarmente por la muerte de su estrella, y en cualquier caso parece una sabia idea que una especie se expanda al espacio para protegerse de la posibilidad de un desastre planetario. La oportunidad: la galaxia tiene 13 mil millones de años de antigüedad, pero la colonización puede tener lugar en un período de sólo unos pocos millones de años. Sin embargo, no los vemos. Si esto fuera un misterio de asesinato, tendríamos un sospechoso pero no un cadáver.

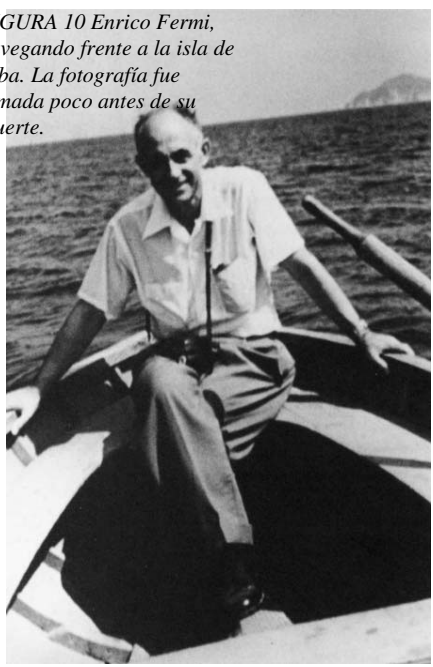


FIGURA 10 Enrico Fermi, navegando frente a la isla de Elba. La fotografía fue tomada poco antes de su muerte.

No todos fueron golpeados por la fuerza de la discusión. Un libro reciente del matemático Amir Aczel defiende la probabilidad de que la vida

extraterrestre sea 1.[28] El físico Lee Smolin escribió que "el argumento a favor de la inexistencia de vida inteligente es uno de los más curiosos que he encontrado nunca; parece un poco como si un niño de diez años decidiera que el sexo es un mito porque aún no lo ha encontrado."[29] El difunto Stephen Jay Gould, refiriéndose a la afirmación de Tipler de que las CETs desplegarían tecnología de sonda para colonizar la galaxia, escribió: "Debo confesar que simplemente no sé cómo reaccionar ante tales argumentos. Ya tengo suficientes problemas para predecir los planes y reacciones de las personas más cercanas a mí. Por lo general, me desconciertan los pensamientos y los logros de los seres humanos en diferentes culturas. Que me condenen si puedo afirmar con certeza lo que alguna fuente extraterrestre de inteligencia podría hacer."[30]

Es fácil simpatizar con este punto de vista. Al considerar el tipo de razonamiento empleado con la paradoja de Fermi, no puedo evitar pensar en la vieja broma sobre el ingeniero y el economista que están caminando por una calle. El ingeniero ve un billete tirado en la acera, lo señala y dice: "¡Mira! Hay un billete de cien dólares en la acera". El economista sigue adelante, sin molestarse en mirar hacia abajo. "Debes estar equivocado", dice.[31] En la ciencia es importante observar y experimentar; no podemos saber lo que hay ahí fuera a menos que miremos. Todas las teorías del mundo no logran nada a menos que pasen la prueba del experimento.[32]

Sin embargo, seguramente el hecho clave de Hart requiere una explicación. Llevamos más de 40 años buscando CETs. Y el silencio continuo, a pesar de las intensas búsquedas, está empezando a preocupar incluso a algunos de los defensores más entusiastas de SETI. Observamos un universo natural cuando fácilmente podíamos observar un universo artificial. ¿Por qué? ¿Dónde están todos? La pregunta de Fermi sigue exigiendo una respuesta.

3

Ellos están aquí

La resolución más simple de la paradoja de Fermi es que “ellos” ya están aquí; o, al menos, “ellos” estaban aquí en el pasado. De las tres clases de solución a la paradoja, ésta es, con mucho, la más popular entre el público en general: la noción de que los OVNIs son naves espaciales extraterrestres es aceptada por muchas personas, mientras que la idea de que las estructuras antiguas fueron construidas por extraterrestres en lugar de por personas se cree casi igual de ampliamente. Los científicos son mucho más escépticos, principalmente debido a la mala calidad de la evidencia de apoyo. Sin embargo, vale la pena considerar seriamente estas ideas como posibles soluciones de la paradoja. De hecho, algunos científicos serios argumentarían que, hasta que no hayamos explorado nuestro vecindario mucho más a fondo y podamos descartar definitivamente la presencia de artefactos extraterrestres, realmente no existe la paradoja de Fermi.

Interpreto el título de este capítulo de manera bastante vaga: Considero “aquí” no sólo a la Tierra sino a todo el Sistema Solar — e incluso, en las dos últimas secciones de este capítulo, a todo nuestro Universo. Sin embargo, para empezar, me referiré a la primera solución sugerida de la paradoja. Se le dio a Fermi poco después de que él planteó su pregunta.

SOLUCIÓN 1: ELLOS ESTÁN AQUÍ Y SE LLAMAN A SÍ MISMOS HÚNGAROS

...el hombre más inteligente que he conocido, sin excepción.

Jacob Bronowski
sobre John von Neumann *en El ascenso del hombre*

La primera respuesta a la pregunta de Fermi llegó casi inmediatamente. Leo Szilard, uno de los compañeros habituales de Fermi a la hora del almuerzo en Los Álamos, bromeó: "Están entre nosotros y se llaman a sí mismos húngaros."

Hubo una historia caprichosa, a menudo contada dentro de la División Teórica de Los Álamos, de que los húngaros son marcianos.[33] Hace millones de años, así dice la historia, los marcianos dejaron su propio planeta y viajaron a la Tierra, aterrizando en lo que ahora es Hungría. En ese momento las tribus europeas eran bárbaras, por lo que los marcianos tenían que hacerse pasar por humanos — si los bárbaros sospechaban que había extraterrestres entre ellos, entonces se derramaría sangre (o más bien el equivalente marciano). Excepto por tres rasgos, los marcianos ocultaron con éxito sus diferencias evolutivas. El primer rasgo fue la pasión por los viajes: ésta encontró su salida en los gitanos húngaros. El segundo rasgo era el lenguaje: El húngaro no está relacionado con ninguna de las lenguas indoeuropeas habladas en los países vecinos de Austria, Croacia, Rumania, Serbia, Eslovaquia, Eslovenia y Ucrania. El tercer rasgo era la inteligencia: su poder cerebral estaba más allá del de los meros humanos.

Desafortunadamente para la teoría, muchos pueblos han exhibido sed de viajes en algún momento de su historia; y la lengua húngara no es única, ya que está relacionada con el finlandés, el estonio y algunas lenguas habladas en Rusia. Pero ese tercer rasgo estaba en evidencia en Los Álamos: Los compañeros de Fermi a la hora del almuerzo no sólo eran el propio Szilard, sino también Eugene Wigner, Edward Teller y John von Neumann. Los cuatro habían nacido en Budapest con diez años de diferencia. Otro húngaro de Los Álamos, Theodore von Karman, también era oriundo de Budapest, pero había nacido un poco antes que los demás. Estos "marcianos" constituían ciertamente un formidable conjunto de intelectos. El físico Szilard hizo contribuciones en varios campos. Teller pasó a ser el principal impulsor del desarrollo de armas termonucleares. Wigner ganó el Premio Nobel de Física en 1963 por su trabajo en teoría cuántica. El ingeniero von Karman realizó los primeros trabajos en cohetería y en la teoría del arrastre supersónico, y su investigación condujo al diseño del primer avión que rompió la barrera del sonido.

Fácilmente el más brillante de los marcianos, sin embargo, fue von Neumann. John von Neumann, a quien volveremos a ver más adelante en el

libro, fue uno de los matemáticos más destacados del siglo XX. Desarrolló la disciplina de la teoría de juegos, hizo contribuciones fundamentales a la teoría cuántica, la teoría ergódica, la teoría de conjuntos, las estadísticas y el análisis numérico, y ganó fama cuando ayudó a desarrollar el primer ordenador digital flexible de programas almacenados. Hacia el final de su carrera fue consultor de grandes empresas y militares, asignando tiempo a varios proyectos como si su cerebro fuera una computadora central de tiempo compartido. Su habilidad para calcular en su cabeza las respuestas a los problemas matemáticos era legendaria — rutinariamente derrotaba a Fermi cada vez que la pareja tenía un concurso de cálculo — y su memoria casi fotográfica sólo añadía un aura de inteligencia sobrenatural. Poseía otros talentos que sonaban muy bien con la historia de "los húngaros son extraterrestres". "Johnny Alegre" (en Argentina diríamos "Jodón") absorbió grandes cantidades de alcohol en las fiestas de Princeton sin perjudicar sus facultades mentales. Estuvo involucrado en accidentes de tráfico a un ritmo alarmante — un cruce en Princeton fue conocido como "Esquina de von Neumann" después de todos los accidentes que causó allí — pero siempre salió ileso. (La conclusión natural es que el alcohol afectó su forma de conducir, pero no hay evidencia de que éste fuera el caso; parece haber sido un mal conductor.

Pero incluso el "hombre más inteligente del mundo" a veces se equivocaba. Aunque desempeñó un papel fundamental en el desarrollo del ordenador digital y, por lo tanto, ha afectado a nuestras vidas como pocos matemáticos lo han hecho, von Neumann aparentemente pensó que los ordenadores siempre serían dispositivos enormes, útiles sólo para construir bombas termonucleares y controlar el clima. No pudo prever completamente el día en que las computadoras estarían incrustadas en todo, desde la tostadora hasta la grabadora. Seguramente un marciano de verdad lo habría sabido mejor.

SOLUCIÓN 2: ESTÁN AQUÍ Y SE INMISCUYEN EN LOS ASUNTOS HUMANOS

Lo que un hombre puede fantasear, otro hombre lo creerá.
William K. Hartmann

Shakespeare hace que Julieta pregunte: "¿Qué hay en un nombre?" En ciertas situaciones la respuesta es: todo. Por ejemplo, durante miles de años la gente ha visto extrañas luces en el cielo.[34] No se prestó mucha atención al fenómeno hasta que las luces adquirieron un nombre pegadizo. Llámalos "platillos voladores" y de repente todo el mundo está interesado.

Podemos fechar el momento preciso en que una persona vio por primera vez un "platillo volador". El 24 de junio de 1947, Kenneth Arnold volaba su avión privado sobre la Cordillera de las Cascadas en el Estado de Washington. Desde su cabina de pilotaje vio varios objetos en el aire; cuando aterrizó reportó su avistamiento, describiendo los objetos como saltando "como platillos a través de un estanque". Se me quedó el nombre. La prensa estaba hambrienta de chismes sobre estos "platillos voladores", y el término encontró resonancia con un público estadounidense que entraba nerviosamente en la Guerra Fría. Mucha gente daba por sentado que los platillos voladores estaban tripulados por alienígenas, ya fueran rusos o extraterrestres.[35]

Si los platillos voladores son reales, si son en realidad naves espaciales tripuladas por extraterrestres, entonces la paradoja de Fermi se resuelve instantáneamente. De todas las propuestas de resolución de la paradoja, ésta es la que cuenta con mayor apoyo entre los ciudadanos. Como las encuestas muestran consistentemente, la mayoría de los estadounidenses creen que los platillos voladores están visitando la Tierra en este momento; la proporción de europeos que sostienen esa creencia es menor, pero sigue siendo significativa. Mucha gente incluso cree que un platillo volador se estrelló en Roswell, Nuevo México, a finales de junio/principios de julio de 1947 (sospechosamente cerca del momento del avistamiento de Arnold), y que el ejército estadounidense recuperó cuerpos extraterrestres de los escombros. Sin embargo, la ciencia no es un proceso democrático. Las hipótesis no son probadas correctas o incorrectas a través de una boleta de votación. No importa cuánta gente crea en la verdad de una hipótesis en particular, los científicos aceptarán la hipótesis (y luego sólo provisionalmente) sólo si explica muchos hechos con un mínimo de suposiciones, si puede soportar una crítica vigorosa, y si no va en contra de lo que ya se sabe. Por lo tanto, la pregunta es: ¿qué tan bien se sostiene la hipótesis de que los platillos voladores son evidencia de CETs?

* * *

Antes de discutir esto, es mejor acordar usar el término neutro "objeto volador no identificado", u OVNI, cuando se examinen afirmaciones sobre luces u objetos extraños en el cielo.

El término fue acuñado por Edward Ruppelt, quien emprendió una investigación sobre los OVNIs para la USAF.[36] Desafortunadamente, los términos "OVNIs" y "platillo volante" a menudo se usan indistintamente. Pero si se usa correctamente, un OVNI es justamente eso: un fenómeno aéreo no identificado. Todo lo que vemos en la atmósfera es un OVNI o un OVI (un objeto volador identificado). Sólo después de una investigación puede un OVNI convertirse en un OVI; un OVI *puede* resultar ser un platillo volador — pero sólo después de un escrutinio cuidadoso podemos hacer esa determinación.

Bajo esta definición, es innegable que existen OVNIs. De hecho, es tentador decir que si no has visto un OVNI, ¡entonces no has estado buscando lo suficiente! El cielo alberga una miríada de fenómenos interesantes, tanto naturales como artificiales. Sin embargo, incluso con un examen superficial, la mayoría de los OVNIs son explicables; se convierten en OVIs. La gente a menudo confunde a Venus con un artefacto; los aviones pueden crear efectos visuales inusuales; cada día, 4000 toneladas de roca y polvo extraterrestre se queman en la atmósfera de la Tierra y producen un espectáculo de luces ocasional; y así sucesivamente. Algunos OVNIs se convierten en OVIs sólo después de una investigación exhaustiva y detallada. (Por ejemplo, los espejismos de la novaya zemlya, fata morgana y fata bromosa han engañado a la gente durante cientos de años. Son causadas por condiciones atmosféricas relativamente raras; ¿tal vez el mismo mecanismo pueda explicar algunos OVNIs?

Tal vez algunas de esas extrañas luces en el cielo son los rayos de los faros de los coches refractados a través de condiciones de aire anormales. Algunos OVNIs podrían ser el resultado de accidentes (una misteriosa luz resultó ser el resultado de una pelota de golf lanzada sobre una hoguera — ¿quién sabe qué otros efectos podrían producir los eventos cotidianos? La explicación de algunos OVNIs podría incluso requerir avances en la ciencia (el fenómeno del relámpago de bola, por ejemplo, es poco conocido y no está bien investigado — irónicamente por las mismas razones por las que muchos científicos se sienten incómodos con la idea de los OVNIs). Finalmente, muchos OVNIs resultan ser el resultado de engaños deliberados.

Sobre la investigación, entonces, la mayoría de los OVNIs se convierten en OVIs. Pero cada año hay un pequeño residuo de casos en los que no se dan cuentas racionales. Esto no debería sorprendernos. Después de todo, como señala el notorio escéptico Robert Sheaffer, la policía no logra una tasa de solución del 100% para los asesinatos.[37] Pero mucha gente encuentra esto inaceptable cuando habla de OVNIs; quieren una explicación para todos los avistamientos. ¿Cómo podemos explicar estos OVNIs? Hay dos casos a considerar: avistamientos de luces en el cielo, y avistamientos de — quizás

incluso encuentros con — extraterrestres o tecnología alienígena.

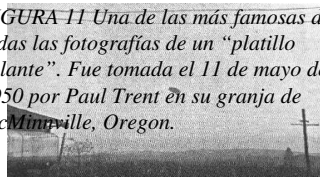


FIGURA 11 Una de las más famosas de todas las fotografías de un "platillo volante". Fue tomada el 11 de mayo de 1950 por Paul Trent en su granja de McMinnville, Oregon.

Si un OVNI reportado fuera simplemente una luz en el cielo, entonces uno podría argumentar que, no importa lo extraño que parezca, no *tenemos* que explicarlo. La vida es demasiado corta para que los científicos puedan explicar cada caso de cada fenómeno. Un científico no tiene que explicar más las circunstancias detalladas que produjeron una luz particular en el cielo de lo que tiene que explicar la forma de la extraña formación de nubes parecidas a las de un dragón que vi esta mañana mientras caminaba hacia el trabajo. Hay cosas más importantes que estudiar.

Pero, ¿y si se *pide* una explicación? Mi sensación es que no necesitamos nuevas hipótesis para explicar los avistamientos anómalos: las razones que explican la mayoría de los OVNIs explicarían *todos* los OVNIs si fuéramos lo suficientemente inteligentes (y si tuviéramos suficiente tiempo) para llevar a cabo las investigaciones. Sheaffer destaca el interesante hallazgo de que el porcentaje de OVNIs "inexplicables" no varía mucho dentro del número total de avistamientos. En otras palabras, ya sea un año ajetreado o un año tranquilo para los avistamientos de OVNIs, la relación OVI/OVNI es casi la misma. Esto no es en absoluto lo que uno esperaría si los "inexplicables" avistamientos de OVNIs representaran una nave alienígena. La explicación más simple de este hallazgo es que, en palabras de Sheaffer, "el residuo aparentemente inexplicable se debe a la naturaleza esencialmente aleatoria de la percepción y los informes erróneos".

Nada de esto demuestra que *no* recibamos visitas de las CETs. (Tampoco prueba que cuando vemos OVNIs no estemos observando manifestaciones de fantasmas, naves de hadas o la intersección esporádica de seres de dimensiones superiores con nuestro propio espacio-tiempo). Pero tampoco la observación de OVNIs prueba que *estemos* recibiendo visitas. Los avistamientos irreprochables de objetos sólidos y de luces en el cielo son sólo eso: avistamientos de luces en el cielo. La existencia de fenómenos aéreos no identificados simplemente no proporciona ninguna evidencia de la existencia de visitas extraterrestres.

¿Y si el OVNI reportado era algo *más* que una luz en el cielo? ¿Cómo podemos explicar los avistamientos del "encuentro cercano"? Desafortunadamente, los avistamientos *interesantes*, los eventos que probarían la hipótesis del platillo volador, son todos de alguna manera problemáticos.

Se afirma, por ejemplo, que los extraterrestres secuestran a personas, las someten a investigación y las obligan a mantener relaciones sexuales. Sin

embargo, no importa cuán plausibles sean estas historias (admito libremente que son tendenciosas; encuentro las historias totalmente inverosímiles, ya que las posibilidades de líneas evolutivas totalmente separadas que producen organismos morfológicamente lo suficientemente similares como para tener sexo son sin duda infinitesimales), la *evidencia* requerida para apoyar tales afirmaciones es inexistente.

Hay informes de que naves alienígenas se han estrellado; el incidente de Roswell, mencionado anteriormente, es bien conocido. Pero una vez más, ya sea que encuentren o no probable que una nave pueda viajar exitosamente distancias interestelares y aun así fallar en negociar una atmósfera planetaria, la *evidencia* a favor de tales informes es de mala calidad. Un artículo de equipo avanzado o una muestra de una aleación desconocida probaría el caso; en cambio, nos dan un video de una autopsia de uno de los "extraterrestres" del vehículo estrellado de Roswell — un video que era, por supuesto, un engaño (rentable).

Hay reclamos de que naves alienígenas han aterrizado en varios países. En Inglaterra, por ejemplo, se ha culpado a los OVNIs del fenómeno de los agroglifos. Al menos algunos, y tal vez todos, de los círculos de las cosechas son artificiales. En un caso reciente, un confeso fabricante de agroglifos se metió en problemas con la ley. Hizo una forma de 7 puntas después de escuchar a un "experto" decir que los círculos de cultivo de diseño elaborado eran imposibles de hacer para el hombre. (Los círculos de cultivo en realidad tienen una variedad de formas; hay triángulos de cultivo, hexágonos de cultivo, incluso fractales de cultivo. Se habían documentado diseños complejos, por lo que esto era una prueba —según el experto— de que al menos algunos círculos de cultivo eran de origen extraterrestre. El hacedor de círculos de cultivo, armado sólo con algunas tablas, palos de bambú y una antorcha, procedió a crear su forma de 7 puntos durante tres noches en un campo de trigo maduro. Personalmente, admiro su devoción a la racionalidad, pero el granjero no se impresionó; tampoco lo hizo el juez, que emitió una multa de £100 por daños criminales. (Y supongo que, a pesar de la demostración, el experto sigue opinando que los agroglifos son las marcas de aterrizaje de los platillos voladores. En estas situaciones, seguramente deberíamos usar la navaja de Occam, una de cuyas formulaciones es que las explicaciones de los fenómenos desconocidos deben buscarse primero en términos de cantidades conocidas.[38] Podemos explicar los círculos de cultivos, las mutilaciones del ganado y otros fenómenos marginales en términos de cantidades conocidas. No necesitamos la hipótesis del platillo volante para explicarlos.

Siempre que se hace una reclamación extraordinaria por platillos voladores, no se presentan pruebas extraordinarias que apoyen la reclamación. En cambio, recibimos mentiras, evasiones y engaños. La hipótesis del platillo volante puede ser la explicación más popular de la paradoja de Fermi, pero seguramente hay mejores explicaciones.

* * *

Por cierto, debo decir aquí que he visto un OVNI, y sigue siendo uno de mis recuerdos más vívidos. Mientras jugaba fútbol en la calle cuando era niño — esto fue antes de que el creciente número de carros detuviera a los niños jugando en la calle — levanté la vista y vi un círculo blanco puro del tamaño de la luna llena. Las protuberancias a ambos lados del círculo hacían que pareciera que Saturno mostraba sus anillos de lado. Sea lo que sea, pareció flotar durante unos segundos antes de moverse a una velocidad tremenda. Estaba con un amigo, que también lo vio y todavía lo recuerda. Curiosamente, diferimos en nuestros recuerdos: Recuerdo que se alejó a nuestra izquierda mientras mirábamos; mi amigo dice que se alejó a nuestra derecha. (La gente es mala observadora, y sé por experiencia que soy muy mal observador. ¡Pero soy inflexible que se movió a la izquierda!) Definitivamente vimos algo en el cielo ese día y no tengo idea de qué. Pero no, no era un platillo volador. Era sólo una luz en el cielo.

SOLUCIÓN 3: ESTABAN AQUÍ Y DEJARON EVIDENCIA DE SU PRESENCIA

Diles que he venido y que nadie ha respondido.
Walter de la Mare,
Los oyentes

La evidencia de que las CETs están actualmente visitando la Tierra no es convincente. Pero tal vez visitaron la Tierra, o al menos nuestro Sistema Solar, en algún momento en el pasado —quizás hace mucho tiempo, en una etapa del desarrollo humano en la que nadie podía reconocerlos por lo que eran. ¿Hay alguna evidencia de esto? Trabajemos a través del Sistema Solar, comenzando por el hogar.

Tierra

La famosa explosión de Tunguska de 1908 — un evento que derribó acres de árboles a través de la taiga siberiana — se pensó durante mucho tiempo que era el resultado de un golpe de asteroide. Sin embargo, los investigadores no encontraron ninguno de los escombros que uno esperaría de tal impacto. Era un misterio. Una vez que el inmenso poder de las explosiones nucleares se hizo evidente, poco después de la Segunda Guerra Mundial, circuló la noción de que el evento de Tunguska había sido una explosión nuclear — el impacto de una nave espacial alienígena propulsada por energía nuclear que se había estrellado. La idea se tomó a medias seriamente, y había un medio sencillo de probarla: ir a Tunguska y buscar rastros de radiactividad. Esto se hizo, y los científicos no encontraron rastros de radiactividad que pudieran provenir de un motor nuclear. Ahora sabemos que el evento de Tunguska fue probablemente el resultado de un meteoro pétreo que explotó en la atmósfera (aunque la evidencia aún no es concluyente, y varios científicos creen que Tunguska fue golpeado por un cometa). Ha habido eventos similares en el pasado, y tienen una explicación similar: impacto de meteoritos. No hay necesidad de invocar la hipótesis de una nave espacial derribada. Si una nave espacial alguna vez se estrelló en el pasado, no hemos encontrado la evidencia (a pesar de Roswell).

En la década de 1970, Erich von Däniken se hizo famoso por una serie de libros en los que afirmaba que los visitantes extraterrestres construían muchas de las enigmáticas estructuras que salpicaban el mundo: Stonehenge, las líneas de la llanura de Nazca en Perú, las estatuas de la Isla de Pascua, etc.[39] Ninguno de los libros contenía pruebas que respaldaran sus afirmaciones. Sin embargo, su gran público lector lo apoyó durante su larga estancia en la cárcel por fraude; lo apoyaron después de que sus afirmaciones fueran desenmascaradas minuciosa y completamente; sólo cuando se aburrieron y el

gusto y el estilo se movieron lo abandonaron. Ahora, al igual que varios grupos de pop de esa época, von Däniken y sus ideas han vuelto a estar de moda aunque, en los treinta y pico años transcurridos desde que se publicaron por primera vez los libros, no se ha producido ninguna prueba que apoye sus especulaciones, algo que el propio von Däniken admite alegremente y parece encontrar irrelevante. Dado que es poco probable que los partidarios de von Däniken se dejen llevar por argumentos racionales, podemos seguir adelante y aceptar que no hay pruebas de que los miembros de una CET hayan estado alguna vez en la Tierra. (Esto, por supuesto, no quiere decir que definitivamente no hayan estado aquí. Si visitaron la Tierra hace mil millones de años, digamos, ¿quién sabe qué signos —si es que quedan— de su visita? Pero en ausencia de cualquier evidencia de lo contrario, podemos también asumir que la Tierra no ha sido tocada.

Luna

Hasta hace poco, algunas personas afirmaban ver evidencia de CETs en la Luna. En 1953, por ejemplo, el astrónomo Percy Wilkins descubrió lo que parecía ser una estructura artificial — un puente.[40] Sin embargo, otros astrónomos no podían ver la estructura a través de telescopios más poderosos y decidieron, razonablemente, que el puente era un truco de la luz. Esto no amortiguó el entusiasmo de aquellos que creían en la Luna como una morada de vida alienígena. Los entusiastas señalaron que la Luna muestra sólo un lado de la Tierra (para ser precisos, debido al fenómeno de la libración vemos sólo el 59% de la superficie de la Luna). Si nunca vemos el 41% de la superficie lunar, ¿quién sabe lo que podría estar oculto en el otro lado de la Luna? No fue hasta finales de la década de 1970, mucho después de que los numerosos vehículos terrestres y orbitales habían cartografiado toda la superficie de la Luna, que los entusiastas de la "vida" finalmente dejaron de promover la idea de los puentes y otros artefactos. (Al menos, creo que han dejado de promover la idea.)

Puntos Lagrangianos Tierra-Luna

Como veremos más adelante (Solución 12), se puede argumentar que una CET que desee explorar nuestro Sistema Solar enviaría pequeñas sondas no tripuladas en lugar de una flota de naves espaciales tripuladas. ¿Dónde podemos encontrar esas sondas? Hay tres casos a considerar. Primero, las sondas podrían ser programadas para atraer nuestra atención. Ya que no vemos evidencia de balizas, es seguro asumir que tales sondas no están aquí. Segundo, las sondas podrían ser programadas para esconderse de nosotros. El Sistema Solar es un lugar grande, y hay muchos lugares donde podrían esconderse. Puesto que es poco probable que encontremos tales sondas, no necesitamos dedicar tiempo a discutir la mejor estrategia para observarlas.

Tercero, una CET puede enviar sondas sin importar si los humanos las observan. Si ese es el caso, ¿dónde podríamos encontrarlos?[41]

Podemos argumentar razonablemente que de todos los planetas del Sistema Solar, el nuestro es el más digno de estudio. La Tierra es un planeta interesante por una variedad de razones — más importante aún, por lo que sabemos, es el único planeta que alberga vida. Así que lo más probable es que las sondas estén programadas para investigar la Tierra. (Este argumento, por supuesto, huele a antropocentrismo. ¿Quién sabe lo que una mente alienígena podría querer investigar? ¿Quién sabe qué tecnología podría emplear? Pero tal lógica es todo lo que tenemos, así que no perdemos nada si continuamos el argumento y vemos a dónde nos lleva. La superficie de la Tierra sería un sitio pobre para estudios a largo plazo de nuestro planeta. Tendría más sentido ver todo el planeta desde el espacio, donde la energía solar está más fácilmente disponible, y donde no hay necesidad de que la sonda se proteja contra los efectos de la actividad geológica de la Tierra.[42]

Varios tipos de órbita son adecuados para el estacionamiento a largo plazo de sondas observacionales, pero quizás los más conocidos son los puntos de Lagrange L4 y L5.[43]

Si una pequeña masa está cerca de dos grandes masas en órbita, entonces hay cinco puntos en los que la pequeña masa puede orbitar a una distancia fija de las grandes masas. Estos cinco puntos lagrangianos marcan las posiciones en las que la fuerza gravitatoria de las dos masas más grandes equilibra exactamente la fuerza centrípeta necesaria para girar con ellas. A primera vista, entonces, hay cinco puntos en los que las CETs pueden colocar una pequeña sonda con la esperanza de que mantenga una distancia fija de la Tierra y la Luna. Sin embargo, tres de los puntos de Lagrange — L1, L2 y L3 — son inadecuados porque son inestables: empuja la pequeña masa y se alejará del punto L. Pero L4 y L5 son estables: empuja la pequeña masa y volverá al punto L. (Para ser precisos, L4 y L5 son estables sólo si el más masivo de los tres cuerpos es al menos 24,96 veces más masivo que el cuerpo intermedio. Esta condición se cumple en el sistema Sol-Tierra, ya que el Sol es mucho más masivo que la Tierra. También se satisface en el sistema Tierra-Luna, ya que la Tierra es 81 veces más masiva que la Luna. La influencia gravitacional del Sol tiende a desestabilizar los puntos L4 y L5 del sistema Tierra-Luna; sin embargo, difumina los puntos estables en volúmenes de espacio en los que existen órbitas estables.

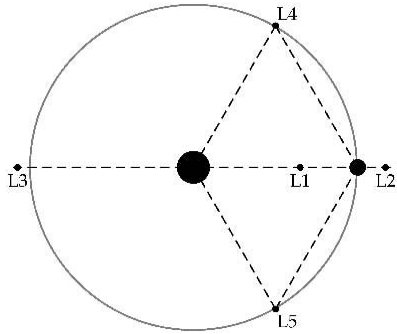


FIGURA 12 Los cinco puntos de Lagrange son lugares en la vecindad de dos masas en órbita donde un tercer cuerpo más pequeño puede mantener una distancia fija de las masas más grandes. Los puntos L1, L2 y L3, que se encuentran en una línea que conecta las dos grandes masas, son inestables: después de una perturbación, el cuerpo pequeño se alejará del punto Lagrangiano. Bajo ciertas circunstancias, los puntos L4 y L5 son estables: después de una perturbación, el cuerpo pequeño regresará al punto Lagrangiano. Los puntos L4 y L5 son estables para el sistema Tierra-Luna, por lo que son un buen lugar para aparcar sondas para el estudio a largo plazo de la Tierra.

La NASA ya está utilizando los puntos Lagrangianos del sistema Sol-Tierra como lugares de estacionamiento para sus satélites. El punto L1 es el hogar de SOHO *(Solar and Heliospheric Observatory [Observatorio Solar y Heliosférico]);* desde el punto L1, SOHO tiene una vista ininterrumpida del Sol. El punto L2 es el hogar del MAP *(Microwave Anisotropy Probe [Sonda de Microondas Anisotrópicas]*); desde allí, el MAP estudiará las arrugas en el fondo cósmico de microondas y descubrirá información sobre el Big Bang. Si la NASA considera conveniente estacionar los satélites en los puntos L, entonces quizás las CETs también lo harían. ¿Quizás podríamos encontrar sondas en puntos de Lagrange en el sistema Tierra-Luna? Bueno, al menos se ha hecho una búsqueda dedicada. Además, los astrónomos ya han estudiado los puntos L4 y L5 del sistema Tierra-Luna, ya que los puntos son interesantes desde un punto de vista astronómico general — el material tenderá a acumularse allí. (Los asteroides troyanos Agamenón, Aquiles y Héctor, por ejemplo, orbitan en los puntos L4 y L5 del sistema Sol-Júpiter). Sin embargo, ni en la búsqueda dedicada ni en los escaneos generales se encontró evidencia de sondas.

Cada vez más, otras órbitas cercanas a la Tierra están siendo escaneadas — esta vez por astrónomos que buscan asteroides potencialmente letales. Como subproducto de esta investigación podríamos esperar encontrar artefactos; sin embargo, hasta ahora no se ha encontrado ninguno. Las sondas emitirían calor, pero no se han observado señales infrarrojas anómalas; cabe esperar que las sondas transmitan mensajes a sus creadores, pero no se han detectado tales transmisiones.

Algunas personas han afirmado que los ecos de radio con retardo prolongado (ErRPs) son transmisiones de sondas CET. El fenómeno ErRPs — ecos radiofónicos que aparecen entre 3 y 15 segundos después de la transmisión de la señal — se ha observado desde el amanecer de la radio, y sigue siendo algo misterioso. Los ecos de radio de la Luna son comunes, pero

el eco aparece 2,7 segundos después de la transmisión de la señal principal —este es el tiempo que tarda la luz en viajar a la Luna y de regreso. Los ecos de Venus, el planeta más cercano, sólo pueden aparecer 4 minutos después de la señal principal. Así que ni la Luna ni Venus pueden ser la causa de los ErRPs. Una explicación es que son retornos de radio de sondas CET que están más allá de la distancia de la Luna. Una explicación más prosaica es que son un fenómeno natural causado por el plasma y el polvo en la atmósfera superior de la Tierra.[44]

Aunque la búsqueda de sondas no está completa —de hecho, la búsqueda apenas ha comenzado, ya que la Tierra podría estar bañada en señales a ciertas frecuencias y no necesariamente sabríamos de ellas— todas las observaciones realizadas hasta la fecha han dado un resultado negativo. (Curiosamente, nuestros telescopios *han* detectado ocasionalmente transmisiones de una sonda en las profundidades de nuestro Sistema Solar; pero son de la nave espacial Pioneer, no de una nave CET.

Marte

Durante mucho tiempo se pensó que Marte era el hogar de la vida,[45] pero gran parte del alboroto provenía de una mala traducción.[46] Giovanni Schiaparelli, en una serie de observaciones que comenzaron en 1877, vio rasgos en Marte que él llamó *canali* —una palabra italiana que significa "canales" o "canales". De sus escritos se desprende claramente que Schiaparelli, cuando nombró estos rasgos, pensaba que los procesos *naturales* los habían formado. Los astrónomos de habla inglesa, sin embargo, tradujeron la palabra como "canales" — estructuras *artificiales* que conectan dos cuerpos de agua.

Percival Lowell también vio los rasgos superficiales registrados por Schiaparelli, y finalmente contó 437 de ellos.[47] Sin embargo, Lowell no reconoció que estaba trabajando en los límites de la observación; no se dio cuenta de que la evolución ha preparado al sistema visual humano para buscar rasgos familiares en patrones aleatorios. Se convenció de que veía canales lineales construidos artificialmente, y especuló que los canales suministraban agua desde los casquetes polares a un mundo desértico.

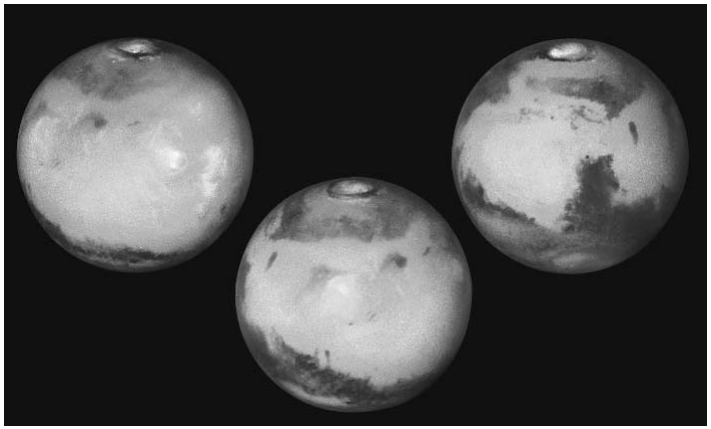
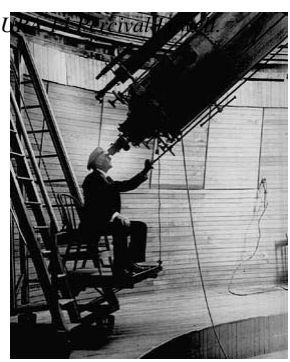


FIGURA 13 Marte como fotografiado por el Telescopio Espacial Hubble, cuando el planeta rojo estaba en su punto más cercano a la Tierra

La noción de canales estaba en la conciencia pública de todos modos — el Canal de Suez, una maravilla moderna del mundo, se había abierto a la navegación en 1869 — y el público en general estaba cautivado por la posibilidad de que seres inteligentes hubieran construido los canales marcianos. Los escritores de ciencia ficción se apresuraron a utilizarlo como fuente de historias. Era una noción popular y romántica, e incluso en 1960 algunos mapas del planeta mostraban oasis y canales; y varios astrónomos continuaron creyendo que los cambios estacionales en las marcas de la superficie marciana podrían deberse a los cambios en los patrones de vegetación.

FIGU



Mientras tanto, a principios de la década de 1960,[48] Shklovsky discutió una peculiaridad en la órbita de Fobos, la mayor de las dos lunas de Marte, y ofreció una ingeniosa explicación.

La órbita de Fobos está decayendo. La peculiaridad era que, según las observaciones realizadas por Bevan Sharpless en la década de 1940, la *tasa* de deterioro era difícil de explicar. Se sugirieron varios mecanismos —el efecto de un hipotético gran campo magnético marciano, la interacción de las mareas con Marte, una posible influencia solar— pero ninguno de ellos era factible.

Tampoco era obvia la explicación de que Fobos estaba pasando a través de

las delgadas regiones exteriores de la atmósfera marciana, ya que la resistencia no afectaría a una roca del tamaño de Fobos en la medida observada por Sharpless. El audaz Shklovsky se preguntaba si Fobos era *hueco*. Un Fobos hueco sería menos masivo de lo que su tamaño sugiere, por lo que su órbita se vería más afectada por la atmósfera marciana. Si Fobos realmente era hueco, entonces no podía ser natural: Shklovsky así sugirió que el satélite era artificial — el producto de una civilización marciana. (Fue una sugerencia más imaginativa que nada en los libros de von Däniken, sin embargo, se basó en los mejores datos de observación disponibles.

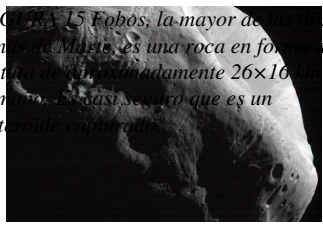


FIGURA 15 Fobos, la mayor de las dos lunas de Marte, es una roca en forma de patata de aproximadamente 26×16 km de tamaño. Es casi seguro que es un asteroide capturado.

Shklovsky pensó que el satélite habría sido lanzado hace millones de años, pero otros científicos pensaron que el lanzamiento podría haber sido más reciente. Frank Salisbury señaló que las lunas marcianas fueron descubiertas en 1877 por Asaph Hall, quien usó un telescopio de 26 pulgadas.[49] Quince años antes, cuando Heinrich d'Arrest entrenó un telescopio más grande en el planeta rojo, las condiciones para ver Marte habían sido mejores. ¿Cómo pudo d'Arrest perderse las lunas en 1862? ¿Era posible, preguntó Salisbury, que las lunas fueran satélites artificiales lanzados entre 1862 y 1877?

La noción romántica de una civilización marciana avanzada capaz de construir canales y lanzar satélites no sobrevivió a la década de 1960. Fue enterrado cuando la temprana nave espacial Mariner pasó volando a corta distancia, devolviendo fotografías que no mostraban ninguno de los canales vistos por Lowell. Las misiones Viking de 1976 y las misiones Pathfinder y Mars Global Surveyor de 1997 tampoco lograron encontrar canales. Del mismo modo, las misiones de vuelo mostraron que no hay nada artificial en Fobos. Se trata de un pequeño trozo de roca manchada de viruela — casi con toda seguridad un asteroide capturado. Además, aunque su órbita está en decadencia, las mediciones recientes indican que la tasa de decadencia es sólo la mitad de la calculada por Sharpless. Con esta medición mejorada, los teóricos pueden ahora explicar el origen del arrastre en Fobos: es el resultado de la interacción de las mareas con Marte. (Fobos se acerca a Marte alrededor de 1 pulgada cada año. El satélite alcanzará Marte en algún momento dentro de los próximos 40 millones de años, dejando una cuenca del tamaño de Bélgica. Aunque 40 millones de años es poco tiempo en la escala astronómica, es mucho tiempo en la escala humana. Una pena, sería un evento espectacular.

FIGURA 16 La "cara" en Marte. Esta imagen de baja resolución contiene muchos puntos negros, que son artefactos de las técnicas de procesamiento de imágenes empleadas por el Laboratorio de Propulsión a Chorro, y no corresponden a ninguna característica marciana.

La evidencia de las varias misiones de sobrevuelo, órbita y aterrizaje casi matan la creencia en una antigua civilización marciana. Casi, pero no del todo. En 1976, Viking fotografió la región de Cydonia en Marte, y la NASA publicó las fotografías poco después. Casi inmediatamente, los entusiastas señalaron que una de las fotografías de baja resolución parecía mostrar un rostro humano. Se podía distinguir un ojo, una boca y una fosa nasal (aunque los entusiastas a menudo no señalaban que la "fosa nasal" era en realidad un artefacto de la forma en que la imagen había sido procesada, y no correspondía a ninguna estructura física en Marte). La cara era grande, aproximadamente un cuadrado de 1 km, y aparentemente tallada en piedra. Los científicos de la NASA enfatizaron que esta era una formación natural; la imagen era simplemente el resultado de la luz del sol cayendo sobre una colina una tarde marciana. Otros argumentaban que la formación era una estructura artificial; la "cara" de piedra era prueba de que Marte fue alguna vez el hogar de una civilización antigua.

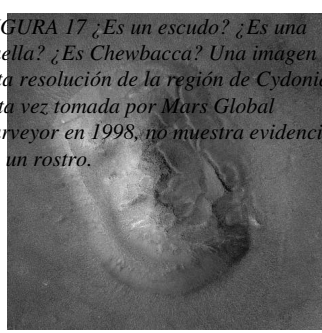


FIGURA 17 ¿Es un escudo? ¿Es una huella? ¿Es Chewbacca? Una imagen de alta resolución de la región de Cydonia, esta vez tomada por Mars Global Surveyor en 1998, no muestra evidencia de un rostro.

Si usted busca a través de una gran colección de datos aleatorios el tiempo suficiente y lo suficientemente duro, ignorando convenientemente los arreglos de los datos que no son de interés y no definir de antemano lo que está buscando, entonces finalmente encontrará algo que parece notable. La

superficie de Marte cubre 150 millones de km^2; sería extraño que uno de esos kilómetros cuadrados *no* se pareciera vagamente a algo familiar. Los científicos planetarios argumentaron que la "cara" marciana tiene tanto significado como los patrones que se ven en las brasas de un incendio. Era otro ejemplo de un observador que imponía un significado a un patrón sin sentido.

El Mars Global Surveyor volvió a visitar la región de Cydonia y tomó una fotografía más detallada. La evidencia de la cara, por supuesto, se evaporó. (Es justo señalar que la iluminación es diferente en las dos fotografías. Sin embargo, las técnicas modernas de imágenes por computadora pueden retener el detalle de la fotografía del Global Surveyor mientras simulan la función con la misma luz de la tarde que vio Viking. Si me aprieto los ojos, entonces casi puedo distinguir a Chewbacca de *Star Wars* — pero sin rostro humano.[50]

Asteroides

Michael Papagiannis argumentó que debemos descartar la posibilidad de que las CETs estén en el Cinturón de Asteroides antes de que podamos concluir que no están aquí.[51] El Cinturón de Asteroides sería un lugar ideal para que las CETs establezcan colonias espaciales. Podrían explotar los asteroides en busca de recursos naturales, y tendrían abundantes reservas de energía solar. Quién sabe — ¿quizás la fragmentación de los componentes del Cinturón de Asteroides es el resultado de proyectos mineros a gran escala por parte de CETs? Si las colonias espaciales *estuvieran* en el Cinturón de Asteroides, no necesariamente sabríamos de ellas; las naves de un kilómetro o menos de tamaño serían difíciles de distinguir de los asteroides naturales.

Por otro lado, si realmente están en el Cinturón de Asteroides, hay preguntas que hacer. ¿Por qué no hemos detectado fugas de radiación electromagnética? ¿Por qué no hemos observado un solo objeto que posea una temperatura efectiva superior a la justificada por su distancia al Sol? ¿Y por qué, si están allí, han permanecido en silencio durante tanto tiempo?

Sistema Solar Externo

Más allá de los asteroides podemos ver numerosas "anomalías" — como la inclinación axial de Urano o la órbita retrógrada de Tritón — que podrían ser tomadas como evidencia de manipulación por las CETs. David Stephenson, por ejemplo, sugirió que la órbita inusual de Plutón es el resultado de un proyecto de astroingeniería.[52] Estas anomalías, sin embargo, pueden ser explicadas más prosaicamente como resultado de colisiones e interacciones que tuvieron lugar en la historia temprana del Sistema Solar. Simplemente no hay necesidad de invocar otras explicaciones.

* * *

Cuando empezamos a hablar de los planetas exteriores también empezamos a darnos cuenta de lo grande que es el Sistema Solar. Hay 2×10^{20} km^3 de espacio dentro de una esfera que encierra la órbita de Plutón; y el Sistema Solar se extiende hasta la Nube Oort de cometas, mucho *más allá* de Plutón. Las posibilidades de encontrar un pequeño artefacto alienígena por accidente son esencialmente cero. Sólo si un artefacto llama la atención sobre sí mismo — señalándonos, tal vez, o estando en un lugar visible — lo detectaremos. Por lo tanto, no podemos descartar la posibilidad de que las sondas de observación estuvieran alguna vez en el Sistema Solar ni, de hecho, que todavía estén aquí. Algunos argumentarían que hasta que no podamos descartar esa posibilidad, no existe la paradoja de Fermi.

Podemos decir con confianza, sin embargo, que todavía no se ha descubierto ninguna evidencia de artefactos extraterrestres.[53] Si no los observamos, ¿por qué asumir que podrían estar allí? (Además, si las sondas *están* en el Sistema Solar, todavía nos queda el problema de por qué han dejado sola a la Tierra.

De vuelta a la Tierra

Quizá estemos buscando en el lugar equivocado. La discusión ha girado en torno a los artefactos extraterrestres — la evidencia de los objetos de ingeniería. ¿Quizás una CET ha estado aquí y ha dejado *información* en lugar de *cosas*?

Una entretenida historia de SF de los años 50 sugirió que la razón por la que a tanta gente no le gustan las arañas es que la clase Arácnida consiste en criaturas extraterrestres. Fueron traídos aquí en una nave espacial, y luego escaparon; los humanos, reconociendo instintivamente la herencia alienígena de las arañas, retroceden de ellos. (Como veremos más adelante [Solución 43], toda la vida en este planeta está relacionada; por mucho que te desagraden las arañas, compartes una gran parte de tu ADN con ellas. En la década de 1970, algunos científicos finalmente se pusieron al día con los escritores de SF e hicieron la sugerencia de que el material biológico podría llevar un mensaje codificado de una CET. En teoría, esto sería posible: después de todo, el objetivo del ADN es que codifica la información.

Un mensaje codificado en el ADN parece un canal de comunicación poco probable. Por un lado, el remitente sólo podía transmitir un mensaje a un planeta que poseía la misma bioquímica. (En nuestro caso, la bioquímica del remitente tendría que estar basada en L-aminoácidos, tener síntesis de proteínas basada en el mismo código genético que la nuestra, y así sucesivamente. Incluso si fuera posible para el receptor distinguir entre una secuencia natural y un mensaje artificial, con el tiempo el contenido del mensaje podría distorsionarse a través de mutaciones aleatorias. Y los caprichos de la evolución podrían borrar el mensaje por completo. Sin embargo, se han realizado algunas investigaciones para probar la idea,[54] y el

análisis de ciertos tipos de ADN viral no ha encontrado nada que se parezca a un patrón artificial. Ahora que los biólogos han secuenciado todo el genoma de varias criaturas, incluyendo al hombre, se podrían realizar búsquedas más detalladas de mensajes codificados. Estas búsquedas deben ser de bajo nivel en la lista de prioridades de los genetistas, pero eventualmente alguien revisará los datos del genoma en busca de patrones. Mi suposición es que si los patrones *pueden* ser encontrados, tendrán la misma fuente que los canales marcianos y la cara de Cydonia. Tales patrones son evidencia de inteligencia — pero al final del telescopio o microscopio del observador.

SOLUCIÓN 4: ELLOS EXISTEN Y SOMOS NOSOTROS — ¡TODOS SOMOS EXTRATERRESTRES!

Debería haber sabido qué fruto brotaría de tal semilla.

Lord Byron,
Childe Harold

En la sección anterior consideramos la idea de que las CET podrían haber codificado mensajes en el ADN de organismos terrestres. Aunque esta es una posibilidad remota, una versión más amplia de la idea es, paradójicamente, más plausible. Con cada avance en el estudio de la genética se hace cada vez más evidente que toda la vida en este planeta está profundamente relacionada. Tal vez las especies individuales no son extrañas, pero no podemos descartar la posibilidad de que todas las especies provengan de la misma fuente extraterrestre. Tal vez *todos* seamos extraterrestres.

La idea de que la vida se originó en otro lugar y fue de alguna manera transportada a la Tierra es antigua. La noción de *panspermia* — literalmente "semillas por todas partes" — probablemente se remonta a Anaxágoras. Algunos de los mejores científicos del siglo XIX hablaron de varias formas de panspermia, pero fue un libro de Arrhenius en 1908 el que popularizó la noción. Arrhenius supuso que el Universo está lleno de esporas vivientes que son conducidas a través del espacio por la presión de la luz de las estrellas. Tales esporas cayeron en la Tierra primitiva, florecieron y evolucionaron hasta convertirse en la vida que vemos hoy.[55]

Como discutiremos con más detalle más adelante (Solución 43), uno de los misterios profundos del origen de la vida es la indecente prisa con la que surgió en la Tierra. Apenas parece haber tiempo suficiente para que los procesos físicos y químicos aleatorios generen vida a partir de trozos de materia inanimada. La idea de la panspermia es atractiva, ya que elimina el problema de las escalas de tiempo: la vida cayó "ya hecha" en la Tierra. Sin embargo, la hipótesis de Arrhenius rápidamente cayó de favor. Una de las razones por las que la idea fue archivada fue la dificultad de imaginar esporas lo suficientemente resistentes como para soportar los rigores de un viaje de eones a través del espacio; en particular, la radiación seguramente sería mortal para las esporas. Otra razón fue que simplemente eliminó el problema del origen último de la vida de la Tierra a algún lugar en el espacio (aunque por supuesto sería bueno saber dónde se originó la vida, aunque sólo sea para resolver un hecho de la historia).

La idea de que puede haber vida microbiana en el espacio no desapareció por completo. Por ejemplo, Hoyle y Wickramasinghe defendieron la idea de que los microbios viajan a la Tierra en cometas, causando ocasionales brotes masivos de enfermedades.[56] El reclamo recibió cierta credibilidad por el descubrimiento de que las bacterias viajaban a la Luna en alunizadoras

lunares no tripuladas, y seguían vivas cuando fueron traídas de vuelta a la Tierra por los astronautas de Apolo. Es evidente que algunos microorganismos pueden sobrevivir en el duro entorno del espacio, aunque sólo sea por unos pocos años.

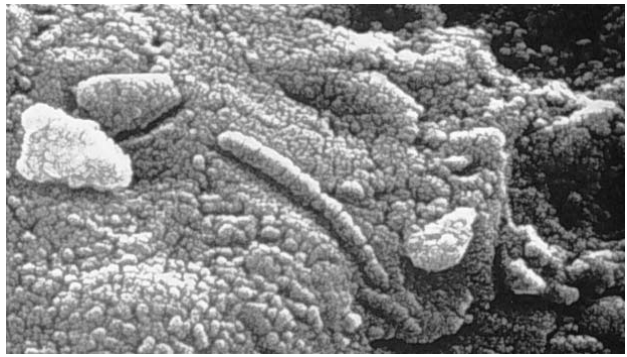


FIGURA 18 Cuando se ve bajo un aumento extremo, la roca ALH84001 — un meteorito de Marte — contiene estas extrañas estructuras parecidas a gusanos. ¿Son estas estructuras microfósiles de bacterias marcianas, o artefactos de las técnicas utilizadas para ver la roca con un aumento tan alto?

Además, el tan esperado anuncio en 1996 de que el meteorito marciano ALH84001 podría contener microfósiles bacterianos llevó a algunos científicos a sugerir que la vida comenzó en Marte. Posteriormente, los microbios viajaron a la Tierra dentro de los meteoritos, lo que los protegería del duro entorno del espacio. Es una sugerencia atractiva: las condiciones en el principio de Marte podrían haber sido más propicias para el surgimiento de la vida que en el principio de la Tierra. Sin embargo, el escepticismo está en orden. Trabajos recientes sugieren que los llamados microfósiles pueden ser artefactos de los procedimientos utilizados para ver la roca con un aumento extremo. El caso ALH84001 es quizás otro ejemplo en el que Marte ha llevado por mal camino a los científicos, haciendo que aquellos que están trabajando en los límites de la observación vean patrones que no están allí.

Aunque la panspermia no está en la corriente principal del pensamiento biológico, es una posibilidad que ciertamente no ha sido descartada. Si resulta ser cierto, entonces las posibilidades de que la vida sea una ocurrencia frecuente en el Universo aumentan enormemente (aunque no dice necesariamente nada sobre la existencia o no de vida *inteligente* y CETs). En 1973, sin embargo, Crick y Orgel publicaron la idea de la panspermia dirigida:[57] panspermia más inteligencia, como dijo Dyson. Crick y Orgel sintieron que la posibilidad de que microorganismos viables aterrizaran en la Tierra después de un viaje interestelar medido en años luz era pequeña. Pero la siembra *deliberada* es diferente. La panspermia dirigida es la sugerencia de que una antigua CET puede haber dirigido deliberadamente esporas hacia planetas con condiciones favorables para la supervivencia de la vida. Tal vez la vida primitiva no llegó aquí al azar dentro de un meteorito; tal vez fue *enviada* aquí a través de una sonda. (¿Por qué una CET siembra planetas de esta manera? Tal vez estaban preparando planetas para su posterior

colonización, pero de alguna manera no lograron llegar a colonizar la Tierra. Tal vez estaban realizando grandes experimentos astrobiológicos. Quizás se enfrentaron a una catástrofe global y querían asegurar la supervivencia de su material genético. ¿Quién lo sabe?)

Es difícil saber cómo probar la hipótesis de la panspermia dirigida. Miles de millones de años después del evento, ¿cómo podemos distinguir entre la vida primitiva que emerge del exudado primordial, la vida primitiva que llega dentro de un meteorito, o la vida primitiva que llega por medio de una sonda espacial? Por ejemplo, ¿por qué sólo hay un código genético en la Tierra? Un código universal sigue naturalmente si toda la vida en la Tierra representa un clon derivado de un solo conjunto de microorganismos. Otro ejemplo se relaciona con la dependencia de muchas enzimas del molibdeno. Este metal es bastante poco común — ocupa el puesto 56 en el orden de abundancia de los elementos en la corteza terrestre — y sin embargo desempeña un papel bioquímico importante. Esta situación un poco extraña sería menos sorprendente si la vida en la Tierra derivara de un sistema en el que el molibdeno fuera mucho más abundante. Por supuesto que los bioquímicos tienen respuestas más ortodoxas a estos rompecabezas, por lo que la evidencia a favor de la panspermia dirigida es débil. Si los biólogos desarrollan una teoría convincente de cómo la vida se originó naturalmente a partir de los materiales disponibles en la Tierra primordial, entonces la panspermia — dirigida o no — sería innecesaria. O Crick y Orgel podrían algún día estar en lo cierto: podemos encontrarnos con la CET que sembró esporas en nuestra parte de la galaxia. Hasta que se demuestre que es verdadera o falsa, la hipótesis de la panspermia dirigida permanece sobre la mesa como una posible resolución de la paradoja de Fermi: las CETs existen porque surgieron de sus semillas. ¿Dónde están ellos? Ellos están aquí, porque *somos* extraterrestres.

SOLUCION 5: EL ESCENARIO DEL ZOOLÓGICO

Alguien me dijo que todo está pasando en el zoológico.
Lo creo, creo que es verdad.

Paul Simon

En 1973, John Ball propuso el escenario del zoológico como un medio para resolver la paradoja de Fermi.[58] (De hecho, Ball lo llamó la "hipótesis del zoológico"; las variantes de la idea, algunas de las cuales se describen a continuación, también se llaman a sí mismas "hipótesis", y aparecen como tales en la literatura. Prefiero llamarlos escenarios, porque en la ciencia una hipótesis suele implicar una especulación enmarcada de tal manera que pueda ser probada. Como veremos, la especulación de Ball no puede ser probada. Esto no quiere decir que el escenario del zoológico sea falso o de alguna manera más improbable que otras explicaciones. De hecho, nos encontraremos con ideas que parecen mucho más salvajes e improbables que la especulación de Ball; pero merecen el término "hipótesis" porque presentan predicciones comprobables.

Ball argumentó que las CETs son ubicuas; muchas civilizaciones tecnológicas se estancarán o se enfrentarán a la destrucción (desde dentro o desde fuera), pero algunas desarrollarán su nivel de tecnología con el tiempo. Discutiendo en analogía con las civilizaciones terrestres, él razonó que necesitamos solamente considerar las civilizaciones tecnológicamente más avanzadas. Las CETs avanzadas, en cierto sentido, estarán en control del Universo; los menos avanzados serán destruidos, domesticados o asimilados. La pregunta importante es: ¿cómo elegirán las CETs altamente desarrolladas ejercer su poder? Argumentando por analogía con la forma en que la humanidad ejerce su poder sobre el mundo natural, en el que dejamos de lado los espacios naturales, los santuarios de vida silvestre y los zoológicos para que otras especies puedan desarrollarse de forma natural, Ball especuló que la Tierra se encuentra en un área silvestre reservada para nosotros por las CETs. La razón por la que no parece haber interacción entre ellos y nosotros es que no quieren ser encontrados, y tienen la capacidad tecnológica para asegurar que no los encontremos. El escenario del zoológico sugería que las CETs avanzadas simplemente nos están observando. (Las variantes de la idea eran menos atractivas; el escenario del laboratorio nos tendría como sujetos de experimentos de laboratorio.

Esta idea general tiene una larga historia en la ciencia ficción, anterior a la publicación de Ball. Por ejemplo, *Star Trek* tenía la "Primera Directiva", que establecía que la Federación no debía interferir con el desarrollo natural de un planeta. (La Directiva fue más honrada en la violación que en la observancia, por supuesto, ya que los escritores tuvieron que generar tramas. Y antes de eso, una tropa establecida de *Astounding* en la década de 1950 (bajo la fuerte

pero quijotesca dirección de John Campbell, *Astounding* era la principal revista SF del día[59]) estaba de la Tierra bajo cuarentena — ya sea porque las CETs nos protegían o, más comúnmente, porque la humanidad era una amenaza para ellos. También se podría argumentar que la solución de Tsiolkovsky a la paradoja —que las CETs han dejado a un lado a la Tierra para permitir que la humanidad evolucione a un estado de perfección— contiene las semillas del escenario del zoológico.

Los creyentes en platillos voladores tienden a favorecer el escenario del zoológico como si legitimara su creencia. Sin embargo, el escenario del zoológico predice específicamente que no deberíamos ver platillos voladores ni ninguna otra manifestación de tecnología superior. Si los platillos voladores son naves espaciales entonces el escenario del zoológico está mal. (James Deardorff propuso una variante de la idea de Ball, conocida como el escenario de embargo agujereado, que es compatible con las observaciones de platillos voladores. La idea es que las CETs avanzadas y benévolas han impuesto un embargo sobre el contacto oficial con la humanidad. Pero el embargo no es total: los alienígenas se ponen en contacto con los ciudadanos cuyas historias probablemente no sean creíbles para los científicos y el gobierno. Los alienígenas quieren prepararnos lentamente para el choque que podría venir después cuando se revelen. La propuesta de Deardorff es tan poco científica —aunque tampoco necesariamente falsa— que probablemente ni siquiera merece el término "escenario"[60]).

El escenario del zoológico ha sido atacado por varios motivos. Un gran inconveniente es que no nos lleva a ninguna parte; no es una hipótesis comprobable. Una buena hipótesis genera ideas para observaciones que pueden confirmarla o falsificarla, y al hacerlo genera nuevas hipótesis. Es difícil pensar en alguna observación que pueda poner a prueba la validez de la especulación. Su única predicción es que no encontraremos CET, pero el hecho de que no los encontremos difícilmente confirma la afirmación inicial. Hay algo insatisfactorio en un enfoque en el que, por mucho que busquemos, por mucho que investiguemos, la ausencia de CET se explica simplemente diciendo que no quieren que los veamos. (Puedo explicar la falta de evidencia observacional para las hadas en la parte inferior de mi jardín diciendo que se vuelven invisibles cuando la gente mira en su dirección. Independientemente de si las hadas existen, esta es una explicación pobre desde un punto de vista científico.

Otra crítica es que es antropocéntrica. (Asumiendo, por supuesto, que somos nosotros los que les interesamos y no los delfines, los monos o las abejas). Sin embargo, puesto que no tenemos absolutamente ninguna concepción de lo que las mentes alienígenas podrían encontrar desviado, no podemos descartar la posibilidad de que la Tierra — por la razón que sea — se ha dejado de lado como el equivalente galáctico de un parque nacional. Una debilidad más grave es que el escenario del zoológico no explica por qué la Tierra no fue colonizada mucho antes de que aparecieran formas de vida

complejas. Quizás el escenario describe la reacción de las CETs al descubrimiento de vida inteligente en la Tierra, pero ¿sería la misma reacción si todo lo que encontraran fueran organismos unicelulares primitivos?

Otra crítica es que sólo hace falta *una* CET para romper el embargo, y sólo una civilización inmadura para meter los dedos entre los barrotes de la jaula, para que los veamos aquí en la Tierra. Además, no explica por qué no observamos ninguna evidencia de ellos en la Galaxia. Ball propone que la vida avanzada e inteligente es omnipresente. ¿Dónde están sus proyectos de ingeniería? ¿Dónde están sus comunicaciones? Una cosa es que mantengan la Tierra libre de desarrollo, pero otra muy distinta es que detengan toda actividad por nuestra cuenta.

Finalmente, sufre de una manera común a todas las soluciones a la paradoja de Fermi que dependen de las motivaciones de inteligencias extraterrestres. Supone que todos las CETs se comporten en todo momento de la misma manera con respecto a nosotros.

Una versión ampliada de la idea, conocida como el escenario de interdicción, intenta generalizar la idea de Ball y abordar algunas de sus debilidades.

SOLUCIÓN 6: EL ESCENARIO DEL INTERDICTO

Siempre ausente, siempre cerca.

Francis Kazinczy,
Separación

En 1987, Martyn Fogg propuso el escenario del interdicto — una forma expandida del escenario del zoológico que proporciona razones por las que *todos* los planetas portadores de vida, no sólo la Tierra, están fuera de los límites.[61]

Fogg primero presentó los resultados de un modelo simple del origen, expansión e interacción de las primeras civilizaciones galácticas. Como muchos autores antes que él, descubrió que, usando valores aparentemente plausibles para los parámetros del modelo, la Galaxia se llena relativamente rápido con especies inteligentes. Dependiendo de los parámetros, unas pocas especies dominan con grandes "imperios" o hay muchos diferentes "imperios" más pequeños. La conclusión del modelo de Fogg es que, cualquiera que sea el valor de los parámetros, las CETs colonizarían la Galaxia incluso antes de que se forme nuestro Sistema Solar.

Fogg argumenta que una vez que la fase de colonización ha terminado y casi todas las estrellas soportan formas de vida inteligentes, la Galaxia entra en una nueva era de "estado estacionario". El impulso expansionista se marchita, y se resuelven los problemas de agresión, territorialidad y crecimiento de la población. La distribución de la inteligencia se vuelve cada vez más mezclada y homogénea, y la era del estado estacionario se convierte en una era de comunicación. De acuerdo con el modelo, estamos en miles de millones de años en esta era (de sonido maravilloso).

Si el escenario de Fogg es cierto, entonces la Tierra está ubicada dentro de una esfera de influencia de una o más CETs avanzadas. Entonces, ¿por qué no han tomado el control? Sostiene que, en una era de estado estable, el conocimiento será el recurso más valioso. Las CETs avanzadas tendrían una razón para dejar en paz a un planeta portador de vida, aunque sólo sea porque el planeta proporcionará una fuente de información no renovable. Y el sacrificio de *espacio vital* no tiene por qué ser grande. Como señaló Asimov,[62] las CETs podrían ir más allá de la necesidad de vivir en un planeta. Si las CETs pueden viajar entre las estrellas en arcas espaciales, entonces no necesitan visitar estrellas parecidas al Sol; cualquier estrella servirá, y las estrellas de tipo O brillantes podrían ser las mejores. Tales arcas espaciales podrían por lo tanto, en principio, evitar estrellas parecidas al Sol con planetas habitables. Fogg sugiere que el número de estrellas que las CETs deben evitar puede ser pequeño: da una cifra del 0,6% para la fracción de estrellas que poseen un planeta portador de vida. Dejar un pequeño número de sistemas sin tocar es un pequeño precio a pagar por el contenido de información que sus

planetas portadores de vida poseerán eventualmente.

En la era del estado estacionario, entonces, una era en la que las CETs se comunican entre sí y se acuerdan enfoques comunes, el "Club Galáctico" acuerda no interferir con planetas ya poblados. En palabras de Newman y Sagan[63], se establece un "Códice Galáctico". La sugerencia de Fogg es que el Sistema Solar fue puesto bajo interdicto cuando, hace miles de millones de años, una CET visitó la Tierra y descubrió organismos primitivos. Desde entonces, los organismos de la Tierra han vivido en un zoológico, estudiado por los complejos patrones de información que generan.

* * *

En mi opinión, algunas de las premisas que subyacen al escenario del interdicto no son convincentes. Para tomar sólo una, creo que la homogeneidad cultural que sugiere Fogg es poco probable que se cumpla. Me parece inverosímil que las inteligencias verdaderamente extraterrestres, si es que existen, puedan comunicarse tan eficientemente que alcancen "un mayor nivel de comprensión [y] un acuerdo mutuo". Los problemas para establecer un sistema de comunicación transgaláctica van mucho más allá de las meras dificultades de traducción. Por ejemplo, la rotación diferencial de la Galaxia hace que una estrella como el Sol se mueva en relación con otras estrellas. Hace cincuenta millones de años, la Tierra pudo haber estado en una región de la Galaxia en la que los guardianes de los zoológicos eran meticulosos; ahora mismo, sin embargo, podemos estar entrando en una región en la que los guardianes de los zoológicos han evolucionado y han decidido tomarse un tiempo libre. Si hicieran eso, ¿quién más lo sabría? ¿Y qué podrían hacer los otros miembros del Club Galáctico para detenerlo? Vivimos en un Universo en el que hay un límite de velocidad para el flujo de información, lo que hace que la homogeneidad cultural galáctica sea extremadamente difícil de lograr. McDonald's puede haber conquistado el mundo, pero no la Galaxia.

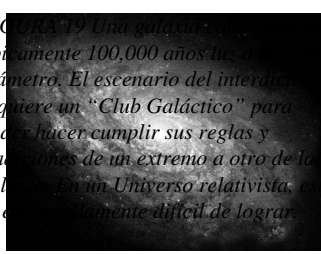


FIGURA 19 Una galaxia [illegible]ne típicamente 100,000 años luz [illegible] diámetro. El escenario del interdicto requiere un "Club Galáctico" para poder hacer cumplir sus reglas y transacciones de un extremo a otro de la galaxia. En un Universo relativista, esto es extremadamente difícil de lograr.

Así que incluso sin cuestionar los parámetros detallados y las suposiciones que sustentan el modelo informático de Fogg, las conclusiones están abiertas al debate. Poniendo esas reservas a un lado, el escenario de interdicto sufre de algunas de las mismas críticas que el escenario original del zoológico. No parece haber manera de descubrir si estamos bajo interdicto (hasta que, tal vez, avanzamos lo suficiente como especie como para ser elegidos como miembros del Club Galáctico). Así que no hay predicciones comprobables. El

escenario también supone que las CETs avanzadas, en todas las etapas de su propia evolución, pueden ocultarnos sus actividades. Bueno, tal vez ellos puedan. Pero si la Galaxia realmente está repleta de antiguas CETs, como se sugiere, ¿no veríamos la estructura ocasional de los grandes astrónomos u oiríamos por casualidad algún chisme interestelar? Poner un planeta bajo interdicto es una cosa; ocultarnos toda la evidencia de su existencia es otra. Finalmente, como se discutió anteriormente, incluso si se estableciera una comunicación profunda en la era de estado estacionario de la Galaxia, ¿realmente surgiría una uniformidad de motivos con respecto a los planetas portadores de vida? La existencia de una sola CET avanzada que no comparta los valores discutidos anteriormente podría ser suficiente para invalidar el escenario.

SOLUCIÓN 7: LA HIPÓTESIS DEL PLANETARIO

Reales son los sueños de los dioses.

John Keats,
Lamia, I

Stephen Baxter ha propuesto una variante interesante del escenario del zoológico. Él lo llama la hipótesis del planetario.[64] (La especulación es mucho más salvaje que la idea de Ball, pero merece el término "hipótesis" en lugar de "escenario" porque ofrece predicciones comprobables). ¿Es posible, se pregunta Baxter, que el mundo en el que vivimos sea una simulación — un "planetario" de realidad virtual diseñado para presentarnos la *ilusión* de que el Universo está desprovisto de vida inteligente?

FIGURA 20: ¿Es un planetario bien diseñado lo que nos impide perdernos en una representación realista del Universo?

La física detrás de tal idea tiene un sentido moderno. De hecho, la hipótesis del planetario sólo podría haber sido propuesta razonablemente en los últimos años — tiempos que han visto un incremento increíble en la potencia de los ordenadores. Y sin embargo, el concepto de "las cosas no son lo que parecen" que subyace en la hipótesis del planetario es un tropo establecido de ciencia ficción. En la novela *Universo* de Heinlein, los habitantes de un barco generacional (ver página 99) encuentran un Universo más allá de los confines de su nave. En un cuento de Asimov, escrito dos años antes de que los satélites soviéticos fotografiaran el otro lado de la Luna, los primeros astronautas en orbitar la Luna no encuentran una superficie con cráteres, sino un enorme lienzo sostenido por dos por cuatro. El "viaje" era una simulación que permitía a los psicólogos estudiar los efectos de una misión lunar en la tripulación. El protagonista de *The News from D-Street*, una historia mucho más sombría de Andrew Weiner, descubre que la totalidad de su mundo familiar pero extrañamente restringido es el producto de un programa de ordenador. Más recientemente, los principales medios de comunicación han explorado el concepto de personas que interactúan con diversas realidades de ingeniería. Varios episodios del programa de televisión *Star Trek: The Next Generation,* por ejemplo, se desarrollaron en la "holocubierta", una tecnología que emulaba objetos materiales con los que los usuarios podían interactuar. La película *The Matrix* tenía a los humanos inmersos por la fuerza en una realidad virtual, esta vez a través de una

tecnología en la que los cerebros eran estimulados directamente por implantes. El protagonista de la película *The Truman Show fue* la estrella involuntaria de un programa de televisión que lo hizo vivir dentro de una realidad de ingeniería; en este caso era una realidad de "baja tecnología", una ciudad falsa debajo de una cúpula pintada diseñada por los productores del programa.[65]

Muchas de estas historias y películas tienen una cualidad inquietante, quizás porque tocan asuntos de profunda preocupación filosófica. Después de todo, las preguntas acerca de la naturaleza de la realidad, y acerca de cómo cada uno de nosotros percibe el Universo externo, han mantenido a los filósofos en el negocio durante milenios. La hipótesis del planetario sugiere que nuestra comprensión aceptada del Universo externo podría ser errónea. Exactamente cuán equivocado depende del tipo de planetario que la CET nos ha proporcionado ("baja tecnología" como *Truman* o "alta tecnología" como *Matrix*) y también de su alcance — la posición de la frontera entre la conciencia humana y la "realidad" externa.

La hipótesis del planetario llevada al extremo es similar al solipsismo. El verdadero solipsista cree que todo lo que experimenta —personas, eventos, objetos— es parte del contenido de su conciencia, más que una realidad externa en la que compartimos. No es sólo que la suya sea la única mente que existe. (El único sobreviviente de alguna catástrofe planetaria podría estar en lo cierto si creyera que su mente era la única, y sin embargo no sería necesariamente un solipsista. Más bien, el verdadero solipsista en principio no puede darle ningún significado a la idea de que otras mentes experimentan pensamientos y emociones. Es una visión egocéntrica del Universo. El planetario más extremo, por lo tanto, haría que una CET generara un Universo artificial directamente en mi conciencia. El Universo me parece vacío porque una CET, por alguna razón, quiere engañarme para que piense así.

El solipsismo parece no llevar a ninguna parte y rara vez se defiende directamente. (El verdadero solipsista a la hora de defender su filosofía presumiblemente tiene que informar a sus oponentes de que no existen, lo que parece absurdo. Los planetarios menos extremos todavía tienen un sabor solipsista pero son ligeramente menos escandalosos. Por ejemplo, quizás nosotros los humanos somos reales, pero algunos o todos los objetos que vemos a nuestro alrededor son simulaciones, como la holocubierta de *Star Trek.* O tal vez la realidad consiste en todo lo que hay en la Tierra más aquellos lugares del Sistema Solar que hemos visitado, pero las estrellas y las galaxias son simuladas — como una versión a gran escala de la cúpula en *The Truman Show*.

La navaja de Occam nos da una buena razón para rechazar todos estos planetarios. Suponga que lanza una bola y observa su trayectoria parabólica: concluirá que la bola es un objeto autónomo que obedece a la ley de la gravedad de Newton. La alternativa —que algún sistema (ya sea una conciencia individual o un sofisticado generador de realidad virtual) contenga

leyes que simulen las propiedades de la pelota y su movimiento bajo la gravedad— es una explicación más compleja del mismo fenómeno. Ambas explicaciones se ajustan a las observaciones. Pero la navaja de Occam nos dice que usemos la explicación más simple, que en este caso es que la pelota es "real". Tiene una existencia autónoma. Podemos hacer el mismo argumento con respecto a nuestras observaciones del Universo.

Por otro lado, si estamos dispuestos a dejar de lado la navaja de Occam por el momento y tomarnos en serio la hipótesis del planetario, Baxter muestra cómo podemos probar si estamos viviendo en ciertos tipos de realidad diseñada. Esto es un avance con respecto a los escenarios originales del zoológico y del interdicto, ninguno de los cuales hace predicciones difíciles.

Baxter señala que un requisito fundamental de un planetario es que los experimentos científicos siempre deben producir resultados consistentes. (En este punto, no preguntamos *por qué* una CET se molestaría en simular un Universo para nuestro beneficio. Basta con señalar que, en teoría, se puede generar una simulación *perfecta* de un sistema, es decir, una simulación que no puede distinguirse del sistema físico original mediante ninguna prueba concebible. Si un experimento pone de manifiesto incoherencias en el tejido de la realidad, entonces podríamos ser inducidos a postular la existencia de un "exterior".

Los físicos pueden calcular la información y las demandas de energía necesarias para crear una simulación perfecta de cualquier tamaño. Por lo tanto, podemos preguntarnos si una CET tiene la capacidad de satisfacer las demandas de energía para la construcción de cualquier planetario en particular. (Tenemos que asumir que los diseñadores de planetarios están sujetos a las mismas leyes de la física que nosotros. Si no lo son — si, por ejemplo, pueden alterar el valor de la constante de Boltzmann — entonces no podemos llevar el argumento más allá.

Resulta que una civilización K1 podría generar una simulación perfecta de unos 10.000 km^2 de superficie terrestre y a una altura de 1 km. En otras palabras, una civilización K1 no podría haber generado una simulación perfecta del antiguo imperio sumerio, y mucho menos de nuestro mundo actual. Por supuesto, un diseñador de planetarios no necesitaría generar una simulación perfecta para engañar a la gente de Sumeria; sería innecesario emular material a 200 m por debajo de la superficie de la Tierra, por ejemplo, ya que era poco probable que los humanos de esa época cavaran tan profundo. Varios trucos y atajos también estarían disponibles para el programador de planetarios — pero tenga en cuenta que la simulación resultante no sería perfecta, y en principio una inconsistencia podría ser revelada. El protagonista de *The News From D-Street* de Weiner se encuentra exactamente en esta situación.

Una civilización K2 podría haber generado una simulación para engañar a Colón. Pero los viajes del Capitán Cook podrían haber descubierto inconsistencias en el diseño de su planetario.

Una civilización K3 podría generar una simulación perfecta de un volumen con un radio de alrededor de 100 UA. Esta es una gran distancia. En comparación, Plutón, el planeta más lejano del Sistema Solar, se encuentra a una distancia media de 40 UA del Sol; la nave espacial Voyager 1, el objeto más distante hecho por el hombre, está sólo un poco más lejos que Plutón. Así que es posible que los humanos sean criaturas en la simulación de alguna civilización K3.

Los límites de Bekenstein

Jacob Bekenstein[66] mostró cómo la física cuántica pone un límite a la cantidad de información que un sistema físico puede codificar. Las relaciones de incertidumbre muestran que la cantidad de información dentro de un sistema de radio R (en metros) y masa M (en kilogramos) nunca puede ser mayor que la masa multiplicada por el radio multiplicado por una constante (que tiene un valor de aproximadamente $2{,}5 \times 10^{43}$ bits por metro por kilogramo). La naturaleza permite que una cantidad sorprendente de información sea codificada antes de que se alcance el *límite de Bekenstein*. Por ejemplo, un átomo de hidrógeno puede codificar alrededor de 1 Mb de información — la mayor parte de un disquete. Un humano típico puede codificar alrededor de 10^{39} Mb de información — mucha más información de la que puede ser manejada por cualquier disco duro existente.

Los sistemas físicos naturales parecen codificar mucha menos información de la que la naturaleza permite. Pero la encuadernación Bekenstein ofrece a los diseñadores de planetarios la oportunidad de diseñar simulaciones perfectas de diferentes tamaños y alcances. Los cálculos termodinámicos estándar nos dan la energía necesaria para construir una simulación perfecta de cualquier tamaño y masa en particular.

Con nuestro nivel actual de tecnología, por lo tanto, somos incapaces de probar si nuestro Universo es "real" o el resultado de una simulación desarrollada por una civilización K3. Pero a medida que sondeemos más del Universo, y hagamos que nuestras sondas viajen más allá de Plutón y hacia los confines del Sistema Solar, llegaremos a un punto en el que podremos estar seguros de que cualquier simulación es menos que *perfecta*. Una simulación podría superar los 100 UA, pero no sería una simulación perfecta; nuestros instrumentos podrían en principio detectar las inconsistencias en una simulación de tan baja calidad. Dentro de unos años, la Voyager 1 cruzará el límite de las 100 UA; si choca con una pared metálica que ha sido pintada de negro, ¡el juego estará listo para los constructores de planetarios!

La hipótesis del planetario desafía tanto a la navaja de Occam como a nuestra intuición básica sobre cómo funciona el Universo. Está al borde de la paranoia suponer que una civilización K3 iría a tal esfuerzo simplemente para persuadirnos de que nuestro Universo está vacío. El propio Baxter lo plantea

sólo como una posibilidad de ser eliminado (y estoy seguro de que no cree que sea cierto). Pero al menos podemos eventualmente eliminarlo. En las próximas décadas, a medida que exploramos más del Universo y probamos el tejido de la realidad a escalas cada vez más grandes, encontraremos una inconsistencia en la simulación o nos veremos forzados a aceptar que el Universo es "real". Y si resulta que el Universo es "real" —que estoy seguro que la mayoría de los lectores estarían dispuestos a apostar es el caso-, entonces tendremos que buscar en otra parte una solución a la paradoja de Fermi.

SOLUCIÓN 8: DIOS EXISTE

El azar es quizás el seudónimo de Dios cuando no quiere firmar.

Anatole France,
Le Jardin d'Epicure

Algunos han sugerido que los científicos del SETI están comprometidos en una búsqueda teológica: puesto que es probable que las CETs estén muy por delante de nosotros, pensaremos en ellos como seres casi omniscientes y omnipotentes. Pensaríamos en ellos como dioses. Muchos científicos del SETI no estarían de acuerdo: La tecnología de la CET puede estar tan avanzada que es, para usar la frase de Clarke, indistinguible de la magia, pero seguramente sabemos lo suficiente como para considerar a estos seres como ingenieros maestros. En el peor de los casos, los veríamos como taumaturgos. Sabemos lo suficiente como para no pensar en ellos como dioses.

Otros han argumentado que Dios — el creador de nuestro Universo — existe. Y que, como Dios está en todas partes, nuestra búsqueda de inteligencia extraterrestre estaría satisfecha si encontráramos a Dios. Estoy desesperadamente incapacitado para argumentar estos puntos. Sin embargo, hay una especulación de los reinos de la física teórica que podría, de ser cierta, demostrar la existencia de muchos otros universos que conducen al desarrollo de las CETs; una sugerencia aún más especulativa es que una de esas civilizaciones creó nuestro propio Universo. Ellos, en cierto sentido, serían Dios. El trabajo es *altamente* especulativo, pero la teoría hace una predicción definitiva que puede ser probada. El argumento es el siguiente.

* * *

Los físicos pueden estar a punto de descubrir una "teoría del todo": una teoría que unifica la gravedad con las otras fuerzas y que explica las relaciones observadas entre las distintas fuerzas. (Hay dos puntos a tener en cuenta aquí. En primer lugar, una "teoría del todo" respondería a las preguntas básicas de la física. Cada tipo de pregunta que un físico podría hacer podría, *en principio*, ser contestada en términos de la teoría. En la práctica, la mayoría de las preguntas no se explicarían en términos de principios fundamentales, del mismo modo que los problemas actuales en la síntesis de proteínas requieren un conocimiento de QCD (Quantum Chromodynamics [Cromodinámica Cuántica]) para sus respuestas. Una teoría del todo ciertamente no tiene que explicar el amor o la verdad o la belleza. En segundo lugar, los físicos expresaron sentimientos similares acerca de una teoría final que se remonta al siglo XIX, por lo que debemos tomar tales anuncios con una pizca de sal. Pero esta vez puede ser realmente diferente.)

El candidato actual para una teoría final se llama teoría M. La matemática

de la teoría M es extremadamente difícil; de hecho, aún no se ha inventado gran parte de la maquinaria matemática necesaria para desarrollar la teoría. Pero supongamos que en las próximas décadas la teoría M se desarrolla con un alto grado de sofisticación. ¿Explicará "todo"? Tal vez lo haga; esa es la esperanza de la mayoría de los trabajadores en el campo. Hay indicios, sin embargo, de que la teoría tendrá una serie de parámetros — tales como las masas de las partículas fundamentales y las fuerzas relativas de las fuerzas fundamentales — cuyos valores deben ser puestos en la teoría "a mano". Las ecuaciones de nuestra teoría final podrían decir, por ejemplo, que la masa del electrón debería ser distinta de cero o que la masa asociada con la constante cosmológica debería ser distinta de cero — pero las ecuaciones podrían no decir nada acerca de por qué esas masas, en unidades naturales, deberían ser tan pequeñas: 10^{-22} y 10^{-60}, respectivamente. Podría resultar que esas masas, y los varios otros parámetros en la teoría, podrían haber tomado *cualquier* valor.

Si una teoría del todo no explica por qué los parámetros fundamentales tienen los valores que observamos, tendríamos una teoría final que describe una multitud de universos posibles. Cada universo tendría valores diferentes para los diversos parámetros fundamentales. Entonces, cómo podrían los físicos responder a una pregunta perfectamente razonable, como: "¿Por qué la masa del protón es 10^{-19} en unidades naturales cuando ingenuamente esperamos que su masa sea de 1?" ¿Cómo podemos proceder?

Un enfoque es decir que los valores de los parámetros fueron establecidos por casualidad. ¿Cómo explicar, sin embargo, el hecho de que los valores observados de estos parámetros parezcan ser necesarios para la vida? Se puede jugar con los parámetros un poco, pero no mucho: la vida requiere química, la química requiere estrellas, las estrellas requieren galaxias... y todos ellos requieren que los parámetros se encuentren dentro de un rango estrecho de valores. Disminuir la fuerza de la interacción fuerte por un factor de 4, digamos, y no pueden existir núcleos estables; no tendríamos estrellas. Si cambias la constante cosmológica por un factor de 10, digamos, terminas con un universo totalmente distinto al que habitamos. Lee Smolin estima que la probabilidad de escoger un conjunto de parámetros aleatorios que generen un universo favorable a la vida es de 1 en 10^{229}. Es difícil transmitir lo *increíblemente* improbable que es esto. Por ejemplo, imagine que tiene un solo billete en una lotería cósmica que tiene aproximadamente las mismas probabilidades que la Lotería Nacional del Reino Unido: alrededor de 13 millones a 1 oportunidad de ganar. Usted podría pensar que vale la pena entrar: no es probable que gane, pero, oye, alguien tiene que hacerlo. Supongamos ahora que los comisionados de esta lotería cósmica son seres avaros. Su lotería ha sido sorteada una vez por segundo, cada segundo, desde el comienzo del Universo hace unos 13 mil millones de años — así que ha habido aproximadamente 10^{17} sorteos. Pero sólo pagan en *uno* de esos sorteos; todos los demás sorteos son nulos, y se quedan con el dinero. Por lo

tanto, sólo hay una posibilidad entre cien millones de millones de que su billete sea elegible para el sorteo; e incluso si es elegible, sólo hay una probabilidad de 13 millones a 1 de que gane. Con estas probabilidades no te molestarías en entrar. Pero la posibilidad de ganar una lotería de este tipo ni siquiera comienza a transmitir la pura improbabilidad de una oportunidad de 1 en 10^{229} que se avecina. Si la estimación de probabilidad de Smolin es correcta, entonces simplemente no podemos apelar a la buena suerte.

Un segundo enfoque es invocar alguna forma de principio antrópico (ver Solución 31 para profundizar el principio). En otras palabras, los parámetros están en sintonía con estos valores improbables para que las criaturas racionales puedan existir. Tal vez Dios estableció explícitamente los parámetros para crear un Universo con vida; o, tomando un punto de vista menos teológico, tal vez haya muchos universos, cada uno de los cuales tiene diferentes leyes y constantes de la física. Entonces debemos encontrarnos en un Universo donde los parámetros conducen a la vida — después de todo, difícilmente podemos encontrarnos en un Universo donde la física no permite que la vida exista. Muchos científicos se sienten incómodos con tales argumentos, ya que cualquier cosa se puede explicar de esta manera; argumentar así es casi una abdicación de la responsabilidad científica. Además, una crítica persistente al enfoque antrópico es que, con un par de excepciones discutibles, no hace predicciones que puedan ser probadas por observación.

Un tercer enfoque, promovido por Smolin, es aplicar las ideas evolutivas de Darwin a la cosmología.[67] Puede que las ecuaciones no sean capaces de explicar por qué los parámetros físicos tienen valores afinados como 10^{-60}, *pero los procesos evolutivos sí.* Smolin sugiere que las constantes físicas — y quizás incluso las leyes de la física — han evolucionado hasta su forma actual a través de un proceso que es similar a la mutación y la selección natural.

¿Cómo puede ser esto? La suposición clave de Smolin es que la formación de un agujero negro en un universo da lugar a otro universo en expansión diferente. Asume además que los parámetros fundamentales del universo hijo son ligeramente diferentes de los del universo padre. (Este proceso es, por lo tanto, bastante parecido a una mutación en biología: el niño tiene un genotipo similar al del padre, pero puede haber una ligera variación). En esta imagen, el Universo en el que vivimos fue generado a través de la formación de un agujero negro en un universo padre con constantes físicas similares a las nuestras. Un universo con parámetros que permiten la formación de agujeros negros tiene descendencia que a su vez producirá agujeros negros. Un universo con parámetros que conducen a poca o ninguna formación de agujeros negros producirá poca o ninguna descendencia. Muy rápidamente, no importa cuán afinados deban estar los parámetros, los universos con parámetros que conducen a la formación de agujeros negros llegarán a dominar: elige un universo al azar y las posibilidades son abrumadoras de que elijas un universo en el que se formen muchos agujeros negros.

Ahora, hasta donde sabemos, la manera más eficiente para que un universo produzca agujeros negros es a través del colapso de las estrellas. Por ejemplo, nuestro propio Universo creará hasta 10^{18} agujeros negros — y por lo tanto, en la imagen de Smolin, universos infantiles — a través del colapso estelar. Así, por improbables que sean los valores de los parámetros físicos fundamentales que permiten la formación de las estrellas, esperamos que la evolución cósmica genere una preponderancia de universos en los que hay innumerables estrellas. Y un universo con parámetros físicos que da origen a las estrellas es un universo que inevitablemente tiene núcleos pesados, y química, y escalas de tiempo suficientes para que aparezcan fenómenos complejos. En otras palabras, es un universo que puede tener vida. El ajuste fino de las constantes beneficia a la producción de agujeros negros más que a la producción de vida. En la imagen de Smolin, la vida es simplemente una consecuencia incidental de un universo que tiene suficiente complejidad para permitir la formación de agujeros negros.

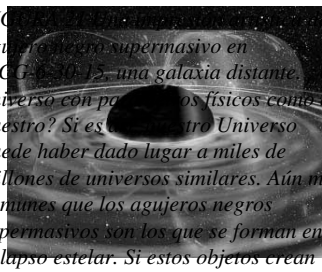


FIG. [illegible] el agujero negro supermasivo en MCG-6-30-15, una galaxia distante. Un universo con parámetros físicos como el nuestro? Si es así, nuestro Universo puede haber dado lugar a miles de millones de universos similares. Aún más comunes que los agujeros negros supermasivos son los que se forman en el colapso estelar. Si estos objetos crean nuevos universos, entonces nuestro propio Universo ¡puede tener 10^{18} descendientes!

Esto puede sonar a especulación, y lo es. De hecho, la idea es casi totalmente especulativa. No hay evidencia (y tal vez nunca pueda haberla) de que la formación de un agujero negro cree un universo en expansión diferente. Aunque se forme un nuevo universo, no podemos responder a muchas de las preguntas que nos gustaría hacernos. (¿Exactamente cómo cambian los parámetros físicos en el nacimiento de cada universo infantil? ¿Un solo agujero negro siempre da lugar a un único universo? ¿Tiene algo que ver la masa del agujero negro? ¿Qué sucede si varios agujeros negros se fusionan? Y así sucesivamente, y así sucesivamente. Hasta que no tengamos una teoría cuántica de la gravedad, no podemos empezar a atacar tales cuestiones. Sin embargo, la idea de Smolin tiene un cierto atractivo: vincula ideas científicas claves —evolución, relatividad y teoría cuántica— para explicar el viejo rompecabezas de los valores de los parámetros fundamentales de la física. Además, hace un pronóstico específico, una predicción contra la cual la teoría puede ser probada. La predicción es que, puesto que vivimos en un Universo que crea muchos agujeros negros y por lo tanto podemos asumir que los parámetros fundamentales están cerca de ser óptimos para la formación de agujeros negros, un cambio en cualquiera de los parámetros fundamentales

llevaría a un Universo con menos agujeros negros.[68]

En algunos casos, los físicos han sido capaces de calcular lo que sucedería si un parámetro fundamental difiriera de su valor observado. En cada caso, llevaría a una reducción en el número de agujeros negros formados por el colapso estelar. En la actualidad, sin embargo, no entendemos lo suficiente acerca de la astrofísica para calcular los efectos de la variación de todos los parámetros. La idea de Smolin no está aceptada ni descartada; sigue siendo una especulación intrigante.

* * *

Edward Harrison lleva la especulación un paso más allá.[69] Él también destaca el rompecabezas de larga data de por qué las constantes físicas *parecen* ser las adecuadas para el desarrollo y mantenimiento de la vida orgánica. La teoría de Smolin explica en parte el rompecabezas, pero Harrison argumenta que el vínculo entre la formación de agujeros negros y las condiciones necesarias para la vida es demasiado tenue. Supongamos, sin embargo, que en algún momento en el futuro, la idea de Smolin se transmuta en una teoría cosmológica establecida. Entonces, sugiere Harrison, podríamos llegar a creer que deberíamos hacer tantos agujeros negros como sea posible, porque al hacerlo aumentaríamos la probabilidad de que otros universos pudieran contener vida inteligente. Si en el futuro lejano *pudiéramos* crear universos infantiles, tal vez *nuestro* propio Universo fue creado por vida inteligente. Tal vez Dios no trabajó durante seis días; tal vez fue una CET, en un universo con parámetros físicos fundamentales muy parecidos al nuestro, el que trabajó para crear un agujero negro — un agujero negro que condujo a la formación de nuestro Universo.

No estoy seguro de que la sugerencia de Harrison pueda resolver la paradoja de Fermi. ¿Podría la CET exprimir algún tipo de mensaje a través del rebote que crea otro universo? Si no, ¿cómo podríamos saber si nuestro Universo fue producido artificialmente en un laboratorio dentro de algún otro universo? Sin embargo, la noción de que podrían escurrirse a través de un mensaje es intrigante. Incluso si *nuestro* Universo estuviera desprovisto de otra vida inteligente, al menos sabríamos que no estamos solos... de alguna manera.[70]

4

Ellos existen pero aún no se han comunicado

La posición que muchos científicos adoptan sobre la cuestión de la vida extraterrestre es la siguiente: la Galaxia contiene decenas de miles de planetas portadores de vida, y en algunos de esos planetas existen CETs que están tecnológicamente muy por delante de los nuestros. Esta conclusión parece derivar del Principio de Mediocridad — la noción de que la Tierra es un planeta típico que orbita un tipo común de estrella en una parte ordinaria de la Galaxia. El principio ha servido bien a la ciencia desde los tiempos de Copérnico. Los científicos que toman esta posición, sin embargo, tienen que responder a la pregunta de Fermi. Si existen las CET, ¿por qué no están aquí? Al menos, ¿por qué no hemos sabido nada de ellas?

Hay una variedad de respuestas, que van desde las tecnológicas (los viajes interestelares son difíciles de lograr, por ejemplo) hasta las sociológicas (por ejemplo, todas las sociedades lo suficientemente avanzadas como para desarrollar viajes interestelares inevitablemente se destruyen a sí mismas). Una debilidad de muchas de estas respuestas, particularmente las respuestas sociológicas, es que para explicar la paradoja de Fermi deben aplicarse a cada CET. Dejo que el lector decida si tales respuestas pueden resolver la paradoja, ya sea por separado o en combinación.

SOLUCIÓN 9: LAS ESTRELLAS ESTÁN MUY LEJOS

...entre las estrellas, qué distancias.

Rainer Maria Rilke,
Sonetos de Orfeo, Parte 2, XX

Quizás la solución más directa a la paradoja de Fermi es que las distancias entre las estrellas son demasiado grandes para permitir el viaje interestelar. Tal vez, no importa cuán tecnológicamente avanzada se vuelva una especie, no puede superar la barrera de la distancia interestelar. (Esto podría explicar por qué las CET no nos han visitado, pero no necesariamente por qué no hemos tenido *noticias* de ellos. Pero hagamos a un lado esta crítica para las próximas secciones.

El hecho de que las estrellas estén lejos no hace en sí mismo inalcanzable el viaje interestelar. No es imposible construir un recipiente que pueda salir de un sistema planetario y luego viajar a través del espacio interestelar. Tomemos como ejemplo nuestro Sistema Solar: su velocidad de escape, a partir de la distancia de la Tierra al Sol, es de sólo 42 km/s. En otras palabras, si lanzamos una nave que viaja a 42 km/s en relación al Sol, entonces puede escapar de la influencia gravitatoria del Sol. Puede convertirse en una nave estelar. No hay problema: ¡la NASA ya ha construido varios de estos barcos! (Con nuestra tecnología actual tenemos que engañar un poco y usar la ayuda de la gravedad ofrecida por los planetas. El llamado "efecto honda" es suficiente para aumentar la velocidad de una embarcación que se mueve lentamente.

El Voyager 1, lanzado el 5 de septiembre de 1977, recorrió los planetas exteriores y luego se dirigió al espacio. El 17 de febrero de 1998 se convirtió en el objeto más lejano hecho por el hombre, y ahora está más lejos del Sol que Plutón. A menos que las sondas alienígenas lo detecten, como sucedió con el ficticio Voyager 6 en *Star Trek: La Película*, finalmente se acercará lo más posible a una estrella — se acercará a 1,6 años luz de una estrella M4 sin pretensiones llamada AC +79 3888. El problema es que la Voyager tardará decenas de miles de años en alcanzar su encuentro más cercano con la estrella. Y *esa* es la dificultad con los viajes interestelares: a menos que se viaje rápido, los tiempos de tránsito son muy largos.[71]

La mejor manera de evaluar la velocidad de una nave estelar es en términos de *c*, la velocidad de la luz, ya que *c* es un límite de velocidad universal.[72] La velocidad de la luz en el vacío es de 299.792,458 km/s. Así que el Voyager 1, que mientras escribo está viajando a 17,26 km/s de distancia del Sol, viaja a sólo 0,000.058*c*. Ahora, las estrellas están tan ampliamente separadas que un método preferido para presentar las distancias interestelares es usar el *año luz*: la distancia que la luz recorre en un año. Por ejemplo, la estrella más cercana a nuestro Sol es Próxima Centauri, que está a 4,22 años

luz de distancia.[73] Por lo tanto, la "nave" más rápida posible — fotones de luz — tardaría más de 4 años en alcanzar la estrella más cercana; la Voyager 1, si viajara en esa dirección, tardaría casi 73.000 años en completar el mismo viaje. El enorme tiempo de viaje que implica viajar a velocidad sub-luz lleva a muchos comentaristas a concluir que los viajes interestelares, aunque tal vez no sean teóricamente imposibles, son impracticables.

Pero quizás la exploración de la Galaxia, incluso a las velocidades de la Voyager, es posible. Como hemos visto (página 74), la noción de panspermia dirigida supone que la Galaxia podría ser sembrada con vida usando sondas de movimiento lento. Y ya en 1929, John Bernal propuso la idea de la "nave de generación" o "arca espacial": una nave autónoma de lento movimiento que constituiría efectivamente el mundo entero para sus pasajeros. Después de partir del planeta natal, muchas generaciones de pasajeros vivirían y morirían antes de que la nave llegara a su destino.[74] La idea de Bernal fue maravillosamente dramatizada en la historia *Universo* de Heinlein.[75] Otra posibilidad sería poner a los pasajeros en animación suspendida, como en la película *Alien*, y revivirlos a su llegada. Incluso se ha sugerido que los embriones congelados podrían ser transportados en embarcaciones de lento movimiento, y luego cultivados en úteros artificiales al final del viaje.

Claramente, sin embargo, si deseamos alcanzar las estrellas en un tiempo razonable, necesitamos construir naves que puedan viajar a una fracción sustancial de la velocidad de la luz. Aun así, los tiempos de viaje pueden ser largos a escala humana. Por ejemplo, ignorando los tiempos de aceleración y desaceleración en cada extremo de un viaje, una nave que viaja a la enorme velocidad de 0,1c tardaría 105 años en alcanzar Epsilon Eridani, que es una de las estrellas parecidas al Sol más cercanas. Pocos tripulantes que verían a su nueva estrella por primera vez recordarían la estrella que su nave dejó atrás. (Cuando hablamos de los tiempos de viaje, tendemos a asumir que la gente elegirá no pasar tantos años de su vida fuera de casa. Pero basamos esta suposición en términos de la vida humana actual. Después de obtener sus títulos, varios de mis contemporáneos más aventureros eligieron pasar un año — que es aproximadamente el 2% de su vida adulta — simplemente viajando alrededor del mundo. Si la duración de la vida humana aumentara en un factor de diez, digamos, entonces quizás un alma aventurera estaría muy dispuesta a pasar una mera década de su vida viajando a las estrellas. Quizás incluso un viaje de un siglo de duración no sería infrecuente. ¿Quién sabe? Como siempre, es difícil discutir sobre actividades futuras basadas en la tecnología actual.

FIGURA 22 La nave espacial Apolo 11, de 110 m de altura, fue lanzada desde la plataforma A, Complejo de Lanzamiento 39, Centro Espacial Kennedy, a las 9:32 a.m., el 16 de julio de 1969. A bordo estaban los astronautas Armstrong, Aldrin y Collins. Este vehículo, el primero en aterrizar hombres en otro

mundo, sería poco práctico para los viajes interestelares.

El tiempo de viaje mencionado anteriormente — 105 años para llegar a Epsilon Eridani, a 0,1*c* — es el tiempo que los observadores terrestres medirían. Las personas en la nave medirían un intervalo ligeramente menor debido al efecto relativista especial de la dilatación del tiempo.[76] Estamos justificados en ignorar los efectos de la dilatación del tiempo para los observadores a bordo que viajan a 0,1*c*, ya que el efecto es sólo de alrededor del 0,5%. Sin embargo, cuanto más cerca está la velocidad de *c*, más notorio es el efecto. Una nave que viajara a Epsilon Eridani a 0,999*c* tardaría 10,5 años en completar el viaje según las mediciones de los observadores terrestres, ¡pero para un miembro de la tripulación el viaje duraría sólo 171 días! Si fuera posible viajar a velocidades infinitesimalmente menores que *c*, entonces *para el viajero* el viaje tomaría sólo una fracción de segundo. Un viaje a las galaxias más lejanas sería posible dentro de una vida humana — aunque para los observadores de la Tierra el viaje tomaría tanto tiempo que la Tierra misma se consumiría en la agonía de la muerte del Sol.[77]

¿Cuál es la probabilidad de que una especie inteligente pueda desarrollar técnicas para viajes interestelares a velocidades razonables? (Por "razonable" me refiero a cualquier velocidad que permita a una misión alcanzar estrellas cercanas en una escala de tiempo de cientos en lugar de decenas de miles de años. Las velocidades altamente relativistas estarían bien, por supuesto, ya que pondrían las estrellas al alcance de los individuos que viven una vida humana. Pero una nave que sale del Sistema Solar viajando a 0,01*c* alcanzará la estrella más cercana en unos 430 años, lo que pone a las estrellas dentro del rango de las naves de generación. Para responder a esto, necesitamos considerar las diversas tecnologías de viajes espaciales que se han sugerido. Aquí sólo doy un breve resumen; las notas del capítulo 7 apuntan a más recursos.

Aunque me concentro aquí en los métodos de propulsión, vale la pena tener en cuenta que hay otros factores a considerar. Por ejemplo, una nave estelar que viajara a alta velocidad sufriría un feroz bombardeo: diminutas partículas de polvo del medio interestelar depositarían grandes cantidades de energía en la estructura de la nave. Proteger la estructura contra tal erosión, y proteger a la tripulación del problema más insidioso del bombardeo de rayos cósmicos, requeriría un escudo sofisticado. También hay un problema de navegación: las estrellas se mueven a velocidades diferentes en tres dimensiones, lo que dificulta que una misión a baja velocidad se reúna con

una estrella en particular.[78] Sin embargo, estos problemas son discutibles si no existen sistemas que puedan propulsar una nave hacia las estrellas. Si los viajes interestelares son imposibles, entonces tal vez tengamos una solución a la paradoja de Fermi.

Cohetes

La idea inicial de la mayoría de la gente para un mecanismo de propulsión de una nave estelar es el cohete autocontenido. Los conocidos cohetes químicos de la NASA obtienen toda su energía y masa expulsora de las reservas a bordo. Considere las misiones Apolo, por ejemplo. Los cohetes Saturno V de varias etapas quemaban propulsores líquidos: una mezcla de queroseno con oxígeno líquido para la primera etapa, e hidrógeno líquido con oxígeno líquido para la segunda etapa. El escape de estas reacciones químicas fue suficiente para alcanzar la Luna, pero este acercamiento simplemente no es factible para viajes interestelares: la estrella más cercana está más de 100 millones de veces más distante que la Luna. ¡Los tanques de queroseno serían enormes!

Sin embargo, puede ser posible emplear variaciones sobre este tema. Durante décadas, los científicos han considerado alternativas a los cohetes químicos. Un cohete de iones, por ejemplo, expulsaría átomos cargados para generar empuje; un cohete de fusión nuclear generaría escape de partículas a alta velocidad por medio de reacciones termonucleares controladas. Tal vez la posibilidad más audaz sea el cohete antimateria, sugerido por primera vez en 1953 por Eugen Sänger. Cuando una partícula de materia entra en contacto con su antipartícula, tanto la partícula como la antipartícula se aniquilan mutuamente y producen energía. Escoger correctamente las partículas iniciales y podría ser posible canalizar los productos de aniquilación en un escape dirigido. Aunque un análisis más profundo mostró que el diseño inicial de Sänger no podía tener éxito, los avances en la física de la antimateria realizados en las últimas décadas han estimulado propuestas que *podrían* algún día conducir a un cohete antimateria.[79]

Estatorreactor de Fusión

Todo el concepto de utilizar un cohete autónomo —que tiene que transportar la fuente de energía y la carga útil— puede resultar poco práctico para los viajes interestelares. ¿Existen sistemas de propulsión que no requieran que la nave lleve su propio combustible? En 1960, Robert Bussard sugirió que un *estatorreactor de fusión* podría llegar a las estrellas.[80]

El espacio entre las estrellas no está vacío. Existe un medio interestelar, compuesto principalmente de hidrógeno. Un estatorreactor utilizaría un campo EM para recoger este hidrógeno y canalizarlo a un reactor de fusión a bordo, que a su vez "quemaría" el hidrógeno en reacciones termonucleares

para producir empuje. Al igual que con el diseño de los cohetes antimateria de Sänger, la propuesta del estatorreactor de fusión de Bussard adolece de una serie de dificultades prácticas. Es poco probable que la idea inicial de Bussard pueda funcionar. Sin embargo, varios estudios han propuesto métodos para mejorar el diseño. Quizás uno de estos diseños podría eventualmente formar la base de una nave estelar en funcionamiento. Los entusiastas siguen siendo atraídos por la posibilidad del estatorreactor , porque en teoría podría alcanzar velocidades cercanas a *c* después de sólo unos meses.

Velas Láser

Más o menos al mismo tiempo que Bussard propuso el estatorreactor de fusión, Robert Forward propuso la *vela láser* como un medio para alcanzar las estrellas más cercanas.[81] Imaginen una vasta "vela" unida a una nave espacial; e imaginen un láser solar gigante apuntando un rayo estrecho de radiación hacia la nave. Los fotones de la viga causarían una presión minúscula en la vela, y la nave sería empujada suavemente hacia las estrellas. Una vela láser podría acelerar a velocidades extremadamente altas; frenar sería más difícil, aunque se han propuesto mecanismos de desaceleración. La idea de Forward ha sido refinada durante las últimas cuatro décadas, y los entusiastas han diseñado esquemas para usar velas láser tanto para una misión de colonización unidireccional como para un viaje de ida y vuelta a las estrellas.[82]

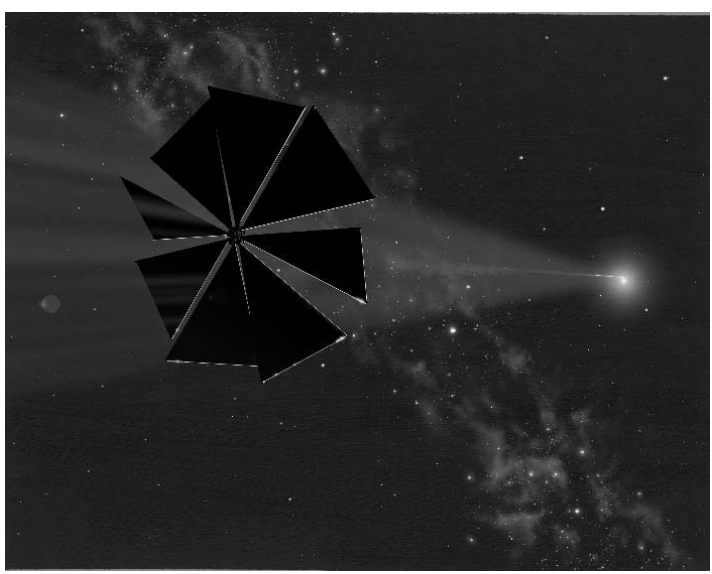


FIGURA 23 Esta hermosa pintura muestra un láser solar basado en el espacio enfocando un rayo en las enormes y ligeras velas de una nave espacial.

Asistencia por Gravedad

En 1958, Stanislaw Ulam consideró la posibilidad de acelerar una nave a alta velocidad utilizando su interacción gravitacional con un sistema de dos cuerpos astronómicos mucho más grandes en órbita uno alrededor del otro. (Es un truco similar a las trayectorias de gravedad que le dieron a la Voyager 1 suficiente velocidad para salir del Sistema Solar. Unos años más tarde, Freeman Dyson consideró escenarios más realistas (aunque todavía, por supuesto, especulativos). Usando el enfoque de Dyson, una civilización tecnológica avanzada podría emplear dos estrellas de neutrones en órbita para acelerar naves espaciales a una velocidad cercana a la de la luz.[83]

Física de fantasía

Las tecnologías mencionadas anteriormente se basan en la física establecida. La construcción de naves estelares utilizando estas ideas está, por supuesto, muy por encima de nuestras capacidades actuales; de hecho, consideraciones de ingeniería pueden imposibilitar *en la práctica* la construcción de naves estelares. Pero parece que no hay nada malo con estas ideas en teoría. No rompen ninguna ley física.

Durante muchos años, la gente se ha preguntado si es posible viajar *realmente* rápido. Si pudiéramos viajar a velocidades mayores que *c*, entonces las estrellas ya no estarían dolorosamente distantes. Un viaje más rápido que la luz (MRL) pondría los extremos de la galaxia al alcance de la mano. Casi todas las ideas para viajes MRL pueden ser descartadas inmediatamente, ya que claramente violan los principios físicos establecidos. Sin embargo, todavía no se han descartado algunas sugerencias.

Taquiones. La teoría especial de la relatividad no prohíbe absolutamente el viaje superlumínico. Más bien, establece que las partículas masivas no pueden ser aceleradas a la velocidad de la luz, mientras que las partículas sin masa (como los fotones) siempre viajan a la velocidad de la luz. Las partículas con masa *imaginaria* siempre deben viajar más rápido que la velocidad de la luz. Estas partículas de masa imaginaria se llaman taquiones.

No hay nada particularmente inusual en las cantidades imaginarias: representamos varias cantidades físicas por números imaginarios. Pero es difícil entender lo que representa una *masa* imaginaria. No tenemos ningún problema en entender la idea de una masa positiva; tampoco hay ninguna dificultad con la idea de una masa cero; podemos incluso atribuirle un significado a la masa negativa (y notar que, si existiera una masa negativa, podríamos usarla en un dispositivo de propulsión).[84] ¿Pero la masa *imaginaria*? Sea lo que sea que signifique, los físicos han buscado señales de ello. Hasta ahora, el taquión sigue siendo hipotético. No hay evidencia de que tales partículas existan, y nuestras teorías funcionan bien sin ellas. Incluso si encontráramos taquiones, ¿cómo podríamos utilizarlos para viajes MRL? Aquí no tenemos ni idea y parece razonable eliminar los motores de taquiones de la lista de posibilidades de propulsión.

Agujeros de gusano y propulsiones warp. La mayoría de nosotros estamos familiarizados con la imagen newtoniana de la gravedad. En la escuela se nos enseña que los objetos masivos se atraen unos a otros ejerciendo una misteriosa influencia a través del espacio vacío. La teoría general de la relatividad de Einstein presenta una imagen muy diferente de la gravedad. Desde este punto de vista, el espacio —o mejor dicho, el espacio-tiempo— desempeña un papel activo en la interacción gravitacional. En palabras de John Wheeler: la masa indica al espacio-tiempo cómo curvarse, y el espacio-tiempo curvado indica a la masa cómo moverse.

Podemos pensar en la relatividad restringida como un caso particular de relatividad general. Se aplica localmente a cualquier región del espacio-tiempo lo suficientemente pequeña como para descuidar su curvatura. El punto interesante a considerar aquí es que la relatividad general permite el viaje de MRL — siempre y cuando se obedezcan las restricciones *locales* de la relatividad restringida. La velocidad de la luz es un límite de velocidad local, pero la relatividad general permite maneras de sortear este límite. Aunque esto puede parecer peculiar, hay ejemplos bien establecidos de fenómenos MRL en relatividad general. Por ejemplo, los modelos cosmológicos estándar sugieren que, debido a la expansión del Universo, las regiones distantes del espacio se alejan de nosotros a velocidades MRL. Sólo si la expansión se ralentiza aparecerán esas regiones sobre el horizonte de la velocidad de la luz y serán visibles para nosotros.

Hasta ahora, la relatividad general ha pasado todas las pruebas experimentales. Predice correctamente la curvatura de los rayos de luz cerca de la extremidad del Sol, las órbitas de los púlsares binarios y la llegada de señales en los sistemas GPS. Sin embargo, la mayoría de las pruebas de la teoría ocurren en situaciones donde la curvatura del espacio-tiempo es pequeña. A veces, la distribución de la materia puede causar una gran curvatura del espacio-tiempo. En la singularidad de un agujero negro, por ejemplo, la densidad de la materia es infinita; el mismo tejido del espacio-tiempo está perforado.

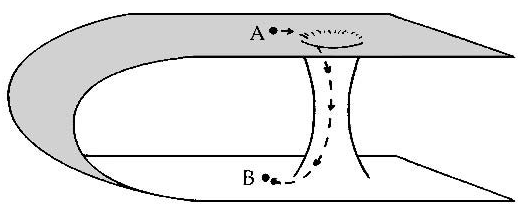


FIGURA 24 Si el espacio se pliega sobre sí mismo, entonces un agujero de gusano que une A a B podría permitir a los viajeros moverse entre estos puntos sin tener que atravesar el espacio-tiempo "normal" entre los puntos.

Es difícil interpretar los resultados de la relatividad general en las situaciones extremas que ocurren cerca de la singularidad de un agujero negro. Tal vez la teoría no pueda ser aplicada en tales situaciones; podemos

requerir una teoría cuántica de la gravedad para describir lo que sucede allí. Pero en un intento de entender estas regiones extremas del espacio-tiempo, los físicos han impulsado la teoría. Una especulación es que la formación de un agujero negro puede llevar a la formación de un agujero de gusano — un "puente" que une dos agujeros negros separados. Los dos agujeros pueden enlazar dos puntos bastante separados del espacio-tiempo, o dos regiones diferentes del Universo. Entra en un agujero negro y puedes emerger del otro, momentos después, a miles de años luz de tu punto de partida. Mientras viajabas a través del puente habrías observado el límite de velocidad local y te habrías movido más despacio que *c*; sin embargo, tu velocidad efectiva podría ser millones de veces mayor que *c*. Sagan usó esta idea en su novela de SF *Contact*.[85]

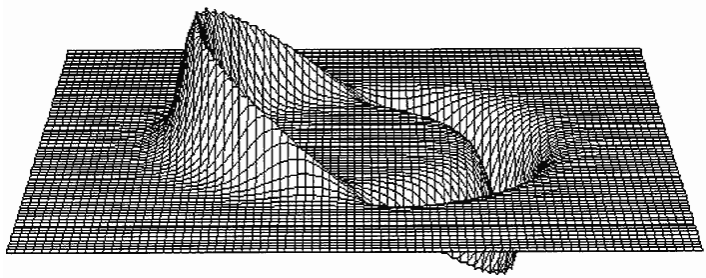


FIGURA 25 La figura muestra la curvatura del espacio en la región de la urdimbre de Alcubierre. El espacio se expande en la parte trasera de la urdimbre y se contrae en la parte delantera; la región plana es empujada hacia adelante.

Aunque basado en trabajo sólido, el agujero de gusano sigue siendo una criatura hipotética en el bestiario del físico teórico. Puede que no existan agujeros de gusano. Incluso si existen, es posible que no podamos viajar a través de ellos: los cálculos sugieren que probablemente sean pequeños y salvajemente inestables. Sin embargo, sigue existiendo la tentadora posibilidad de que una CET en posesión de materia "exótica" (materia con una energía de masa negativa) pueda tomar un agujero de gusano microscópico, estabilizarlo, inflarlo a un tamaño grande — y luego usarlo para atravesar distancias enormes. Recientemente, el físico ruso Sergei Krasnikov ha demostrado que una cierta clase de agujero de gusano se podría construir usando materia "normal" (energía de masa positiva). Quizás una civilización K3 podría utilizar tales agujeros de gusano de Krasnikov para el recorrido interestelar.

Hay otra manera en la que la relatividad general podría permitir el viaje superlumínico (y en el estilo al que *Star Trek* nos ha acostumbrado). Imagine una nave espacial — una tan grande y lujosa como la *QE2* — dentro de una región plana del espacio-tiempo. Todo a bordo de la nave se comportaría como lo hace en la región plana del espacio-tiempo a la que estamos acostumbrados aquí en la Tierra. Ahora imagina que, en la parte posterior del volumen, el espacio se expande (de la misma manera que el Universo mismo se expande). Y en la parte delantera del volumen, el espacio se contrae (como

sucedería si el Universo colapsara en una Gran Contracción). El resultado de esta particular deformación en el espacio es que el volumen de espacio plano, que contiene la nave espacial, se movería hacia adelante, impulsado por la expansión del espacio en la parte trasera y la contracción del espacio en la parte delantera. La nave navega efectivamente en una onda de espacio-tiempo.[86]

La urdimbre puede viajar a velocidades arbitrariamente grandes, quizás muchas veces más rápidas que la *c*, y lleva la nave con ella. En cuanto al volumen local de espacio plano, sin embargo, la nave está en reposo. No hay aumento de masa relativista, ni dilatación temporal. Para la tripulación, todo es normal. A medida que se acercan a las estrellas a una velocidad de 100*c*, los pasajeros son libres de disfrutar de la hospitalidad de la nave espacial *QE2*.

Las propiedades de esta peculiar solución para las ecuaciones de Einstein fueron analizadas por primera vez por Miguel Alcubierre mientras estaba en la Universidad de Cardiff. Tengo debilidad por el motor *warp* de Alcubierre, ya que estaba perdiendo el tiempo en la oficina frente a Miguel mientras él trabajaba en su idea. Sin embargo, es poco probable que la campaña de Alcubierre, al menos como se propuso en un principio, funcione. Primero, no tenemos una idea práctica de cómo producir la curvatura requerida del espacio. Segundo, la densidad de energía dentro de la región deformada es muy grande, y negativa. (Algunos teóricos argumentarían que este segundo problema mata toda la idea de una unidad de Alcubierre en funcionamiento. Sin embargo, la teoría cuántica proporciona circunstancias en las que puede ocurrir una densidad de energía negativa. Si alguna vez avanzamos a la etapa en la que podemos producir grandes cantidades de materia exótica, entonces tal vez podríamos hacer una unidad de Alcubierre. Sin embargo, incluso esto parece improbable. Una urdimbre lo suficientemente grande como para transportar la nave espacial *QE2* requeriría una energía negativa total que es diez veces mayor que la energía positiva de todo el Universo visible! El físico belga Chris Van Den Broeck puede haber encontrado una manera de sortear algunos de los problemas de la unidad de Alcubierre. La construcción de una burbuja de urdimbre microscópicamente pequeña requeriría sólo pequeñas cantidades de materia exótica; combinando esto con alguna gimnasia topológica, que son permitidas en relatividad general, se puede terminar con un volumen interior de la burbuja de urdimbre lo suficientemente grande como para albergar una nave espacial. Sería más bien como la Tardis en *Dr. Who*: microscópicamente pequeña por fuera, pero lo suficientemente espaciosa para los pasajeros por dentro. Podemos encontrar, cuando tenemos una teoría cuántica completa de la gravedad, que el impulso de Van Den Broeck está descartado; en cualquier caso vale la pena enfatizar que el impulso es especulativo y posee características poco realistas (se requieren densidades de energía irrazonablemente grandes, por ejemplo).[87]

Tal vez el transporte de agujeros de gusano y de impulso warp nunca sea

práctico. Pero aún no se ha demostrado que sean imposibles. Tal vez algún día.

Energía de punto cero. El principio de incertidumbre cuántica nos dice que no podemos conocer simultáneamente la posición y el momento de una partícula.

Por lo tanto, incluso en el cero absoluto una partícula debe vibrar, ya que si estuviera en una parada perfecta conoceríamos tanto su posición como su momento. La energía y el tiempo también obedecen al principio de la incertidumbre; de manera similar, entonces, un volumen de espacio vacío debe contener energía (ya que para establecer que la energía era cero tendríamos que tomar medidas para la eternidad). El efecto Casimir[88], una pequeña fuerza de atracción que actúa entre dos placas conductoras paralelas sin carga que se acercan, es el ejemplo más claro de la existencia de la *energía de punto cero* (EPC). El efecto sólo puede explicarse en términos de fluctuaciones cuánticas del campo electromagnético.

Algunos escritores sugieren que hay un suministro infinito de energía en el vacío y que algún día aprovecharemos esta EPC. Quizá podamos usar EPC para un sistema de propulsión. Recientemente, la NASA incluso patrocinó una reunión sobre sistemas de propulsión innovadores en la que se identificó a EPC como una tecnología potencialmente innovadora. Si funciona, entonces tenemos energía barata ilimitada. Personalmente, sigo siendo muy escéptico de la idea; nunca obtenemos algo a cambio de nada. Pero es otra sugerencia de cómo una CET avanzada podría usar las posibilidades inherentes a las leyes de la física para desarrollar tecnologías que parecen casi mágicas para los seres de nuestro nivel de desarrollo.

* * *

Me he referido únicamente a las diversas propuestas relativas a los sistemas de propulsión interestelares. En la actualidad, no podríamos construir *uno* de los dispositivos mencionados anteriormente y utilizarlo para alcanzar las estrellas. Con nuestro nivel actual de tecnología, nos sería casi imposible enviar a la gente a Saturno y viceversa, y mucho menos a Sirio. Hay una serie de problemas —económicos, políticos, científicos y técnicos— que nosotros (y presumiblemente una CET) tendríamos que superar para viajar a las estrellas. Lo que es notable, sin embargo, es el número de métodos que científicos de renombre han propuesto para el vuelo estelar. Los métodos van de lo lento a lo esencialmente instantáneo; de lo probado a lo exótico. Aunque la raza humana no puede construir una nave estelar en 2002, ¿qué tal en 2102? ¿Y en el 3002? Recuerde que 1000 años corresponden a sólo 2,5 segundos del Año Universal. Otras civilizaciones podrían ser millones, incluso miles de millones, de años más antiguas que la nuestra. ¿Es probable que ninguno de ellos tenga la capacidad tecnológica necesaria (o, si los viajes relativistas son imposibles, simplemente paciencia) para los viajes espaciales?

Las estrellas están muy lejos. Este hecho por sí solo puede explicar por qué

no hemos sido visitados (aunque no explica necesariamente el “gran silencio” —la ausencia de señales de las CETs— ni por qué no vemos ninguna otra evidencia de civilizaciones avanzadas). Sin embargo, para aquellos que son optimistas sobre el alcance de la ciencia y la tecnología, la barrera de la distancia puede ser superada. Para esas personas, el tamaño de la galaxia por sí solo no explica la paradoja de Fermi.

SOLUCIÓN 10: NO HAN TENIDO TIEMPO DE PONERSE EN CONTACTO CON NOSOTROS

Si tuviéramos mundo suficiente, y tiempo.
Andrew Marvell,
a su amante de Coy

Una reacción común cuando la gente oye hablar por primera vez de la paradoja de Fermi es: "Oh, no han tenido tiempo de localizarnos." Hart, en su influyente artículo sobre la ausencia de CETs, lo llamó la explicación temporal de la paradoja.

Como vimos en la página 15, Hart argumentó que esta explicación no es defendible. Para recapitular, razonó que si una CET envía naves de colonización a las estrellas cercanas a una velocidad de 0,1*c*, y si las colonias a su vez envían sus propias naves de colonización, entonces esa CET colonizaría rápidamente la Galaxia. Si las naves no se detenían entre viajes, entonces un frente de onda de colonización pasaría a través de la galaxia a una velocidad de 0,1*c*. Si el tiempo entre viajes fuera más o menos el mismo que el tiempo del viaje (después de todo, los viajeros tienen que descansar), entonces el frente de onda de la colonización se movería a 0,05*c*, por lo que podría viajar de un extremo de la galaxia al otro en 0,6 a 1,2 millones de años. Por su facilidad de uso, podemos decir que el tiempo de colonización galáctica es de 1 millón de años.[89]

Un millón de años es mucho tiempo a nivel individual; es mucho tiempo incluso a nivel de una especie entera de mamíferos. Pero es extremadamente corto comparado con el tiempo total disponible para la colonización. Considere las diversas escalas de tiempo involucradas en términos del Año Universal. El tiempo de colonización galáctica corresponde a sólo 41 minutos 40 segundos — menos de la mitad de un partido de fútbol. En esta escala de tiempo, las civilizaciones pueden haber estado apareciendo desde finales de los meses de primavera, y no parece haber ninguna razón convincente por la que la primera CET no pudiera haber surgido alrededor del 1º de Mayo. Así que aunque la primera especie con la inclinación y la capacidad de realizar viajes interestelares podría haber surgido en cualquier momento en los 8 meses entre mayo y diciembre, según Hart la explicación temporal nos pide que aceptemos que esta especie comenzó a viajar no antes de las 23:18 del 31 de diciembre. Sería una coincidencia notable si la humanidad emergiera tan pronto después del surgimiento de la primera civilización estrellada.

El argumento de Hart es convincente, pero uno puede cuestionar varias de sus suposiciones. Un problema obvio es la velocidad del frente de onda de colonización, que Hart asume que es una gran fracción de la velocidad de cada nave espacial. Como Sagan señaló: "Roma no se construyó en un día, aunque se puede cruzar a pie en pocas horas." En otras palabras, para la

ciudad de Roma, la velocidad del "frente de onda de colonización" era una fracción infinitesimal de la velocidad de la nave utilizada para "colonizarla". Más explícitamente, a lo largo de toda la historia de la humanidad nunca ha habido un frente de onda de colonización que se moviera tan rápido como la velocidad de las naves individuales. ¿Por qué debería ser diferente para una civilización ocupada colonizando la galaxia?

Hart calculó su tiempo de colonización galáctica simplemente dividiendo el diámetro de la galaxia por una velocidad de viaje supuesta. Varios autores han desarrollado modelos computarizados más sofisticados de la colonización galáctica y por lo tanto han llegado a tiempos de colonización más plausibles. Eric Jones analizó un modelo en el que la colonización fue impulsada por el crecimiento de la población.[90] Supuso una tasa de crecimiento de la población de 0,03 por año y una tasa de emigración de 0,0003 por año (que fue la tasa de emigración durante la colonización europea de América del Norte en el siglo XVIII). Su modelo demostró que, bajo estas suposiciones, una única CET espacial podría colonizar la galaxia en 5 millones de años. En análisis posteriores ofreció un tiempo de colonización preferido de 60 millones de años (aunque este tiempo puede hacerse mayor con diferentes supuestos para las tasas de emigración y crecimiento de la población). Por supuesto, 60 millones de años es mucho más largo que el tiempo de colonización de Hart, pero todavía es demasiado corto para permitir una explicación temporal de la paradoja de Fermi. A escala humana, un proceso que dura 60 millones de años ni siquiera es glacialmente lento; pero a escala cósmica la onda de colonización se mueve como una inundación repentina a través de la Galaxia.

Sin embargo, Jones mismo hizo suposiciones que pueden ser discutidas. Por ejemplo, Newman y Sagan argumentaron que la colonización galáctica no puede ser impulsada por las demandas del crecimiento de la población.[91] Mira a la humanidad. En el siglo pasado, la población mundial se triplicó con creces. Si la población siguiera creciendo a ese ritmo, y si quisiéramos mantener la densidad de población actual de la Tierra, entonces en unos pocos cientos de años un frente de onda de colonización se estaría moviendo a la velocidad de la luz. Una vez que llegáramos a ese punto, ¡la tasa de crecimiento de la población *tendría* que disminuir! Este es un ejemplo extremo, pero demuestra que las CET no establecerán colonias como medio para evitar el hacinamiento en el planeta de origen. A largo plazo, no pueden superar los problemas causados por el aumento exponencial de la población — simplemente no pueden viajar lo suficientemente rápido. Una civilización tiene que frenar el crecimiento de su población independientemente de que desarrolle o no viajes espaciales. Por lo tanto, Newman y Sagan modelaron la colonización galáctica como un *proceso de difusión*,[92] y aplicaron las bien conocidas matemáticas de la difusión a un modelo particular de colonización. Sus resultados parecieron mostrar que si las CETs practican un crecimiento demográfico cero, entonces la civilización más cercana alcanzaría la Tierra sólo si tuviera una vida útil de 13.000 millones de años. Esto es suficiente para

proporcionar una explicación temporal de por qué los extraterrestres no están aquí (aunque no necesariamente explica por qué no sabemos de ellos).

El modelo Newman-Sagan fue objeto de críticas. En su modelo, resulta que el tiempo de colonización galáctica es bastante insensible a la velocidad de los viajes interestelares. Lo que importa es el tiempo necesario para establecer una colonia planetaria, que a su vez depende de la tasa de crecimiento de la población. Newman y Sagan asumieron tasas de crecimiento de la población muy bajas — tasas que mucha gente encuentra demasiado conservadoras. Incluso si uno acepta sus tasas de crecimiento de la población, hay un problema con su conclusión. La rotación diferencial de la Galaxia convierte la zona de expansión en una espiral, más bien como la trayectoria de una gota de crema espesa cuando lentamente se revuelve en una taza de café. Si se tiene en cuenta este factor, el tiempo de colonización galáctica se reduce drásticamente. Una crítica final: incluso si las CETs avanzadas no son impulsados a expandirse por la presión de la población, ¿no explorarían la galaxia por curiosidad?

Se han analizado otros modelos.[93] Por ejemplo, un cálculo reciente de Ian Crawford sugiere que la galaxia puede ser colonizada en tan sólo 3,75 millones de años. La mayor incertidumbre en esta cifra no es la velocidad de las naves interestelares, sino el tiempo que tardan las colonias en establecerse y luego enviar sus propias naves espaciales. Y Fogg, al desarrollar su escenario de interdicción, analizó los resultados de un modelo en el que las CETs surgen a una tasa de 1 cada 1000 años, y 1 de cada 100 de estas CETs intenta colonizar la Galaxia. Su modelo proporcionó el tiempo para “llenar” la Galaxia para diferentes velocidades de frente de onda de colonización. Incluso bajo las suposiciones más pesimistas, encontró que las CETs llenaron la Galaxia en 500 millones de años, lo cual es corto comparado con la edad de la Galaxia y hace difícil apoyar una explicación temporal de la paradoja.

SOLUCIÓN 11: UN ENFOQUE DE LA TEORÍA DE LA PERCOLACIÓN

Todas las cosas fluyen; nada permanece.
Heráclito

Los modelos de colonización descritos anteriormente abordan la paradoja de Fermi en términos del tiempo que podría tomar uno o más CETs para extenderse por toda la galaxia. El modelo de colonización más reciente, propuesto por Geoffrey Landis, presenta una solución más interesante a la paradoja. Landis basa su modelo en tres supuestos clave.[94]

Primero, asume que los viajes interestelares son posibles pero difíciles. No hay cristales de dilitio; no hay motores warp; no hay *USS Enterprise* que vaya con audacia; sólo un largo y lento recorrido hasta las estrellas más cercanas. Como hemos visto, esta es una suposición razonable: hasta donde sabemos, las leyes de la física no prohíben los viajes interestelares, pero los hacen laboriosos y costosos. Landis argumenta que existe una distancia máxima a partir de la cual una CET puede establecer una colonia directamente. La humanidad, por ejemplo, puede algún día establecer una colonia directamente alrededor de Tau Ceti (a poco menos de 12 años luz de la Tierra), pero le será imposible colonizar directamente ninguna de las estrellas del cúmulo de Hyades (a 150 años luz de la Tierra). Cualquier CET encontrará que sólo hay un pequeño número de estrellas adecuadas para la colonización y dentro de la distancia máxima de viaje desde su planeta de origen. Por lo tanto, cualquier CET sólo establecerá un pequeño número de colonias directas. Los puestos avanzados más distantes sólo pueden establecerse como colonias secundarias.

En segundo lugar, puesto que los viajes interestelares son tan difíciles, Landis asume que una civilización madre sólo poseerá un control débil (y posiblemente inexistente) de sus colonias. Si la escala de tiempo sobre la cual una colonia desarrolla su propia capacidad de colonización es larga, entonces cada colonia poseerá su propia cultura — una cultura independiente de la civilización colonizadora.

Tercero, asume que una civilización será incapaz de establecer una colonia en un mundo ya colonizado. (Esto equivale a decir que la invasión es improbable a distancias interestelares, lo cual parece razonable. Si los viajes interestelares son difíciles y costosos, entonces la invasión debe ser aún más difícil y costosa. Ahí va la trama de varios éxitos de taquilla de Hollywood.

Finalmente, propone una regla. Una cultura o tiene un impulso a la colonización o no lo tiene. Una CET que posea tal unidad definitivamente establecerá colonias alrededor de todas las estrellas adecuadas a su alcance. Una CET que no tenga estrellas no colonizadas a su alcance desarrollará, necesariamente, una cultura que carezca del impulso colonizador. Por lo tanto, cualquier colonia tendrá alguna probabilidad de convertirse en una

civilización colonizadora, y una probabilidad de convertirse en una civilización no colonizadora.[95]

Estas tres suposiciones, más la regla, generan un *problema* de percolación. La tarea clave en un problema de percolación es calcular, para un sistema específico, la probabilidad de que haya un camino continuo desde un extremo del sistema al otro. La palabra "percolación" proviene de la frase latina que significa "fluir a través de", y aquellos que desarrollaron la teoría de la percolación tal vez tenían en mente la percolación del café cuando la nombraron: para hacer una bebida, el agua debe encontrar un camino a través del café molido y dentro de la olla. Preparar café es un ejemplo particular del problema general de la difusión de líquidos a través de un sólido poroso; pero también se han utilizado modelos de percolación para estudiar fenómenos tan diversos como la propagación de incendios forestales, la propagación de enfermedades contagiosas en una población, la formación de estrellas en galaxias espirales y el comportamiento de los quarks en materia nuclear.[96]

En esencia, la percolación es meramente una manera de llenar una gran cantidad de espacios vacíos con objetos. (Estrictamente, la teoría de percolación es válida sólo para matrices que son infinitamente grandes, por lo que los sistemas de interés deben ser grandes para que se aplique la teoría de percolación. No es necesario que el arreglo sea rectangular ni bidimensional: algunos fenómenos se modelan mejor con un arreglo unidimensional, otros con un arreglo tridimensional y otros con arreglos de dimensiones superiores. Para arreglar ideas, sin embargo, es más fácil imaginar una gran matriz bidimensional de N celdas, más bien como un tablero de ajedrez extendido.

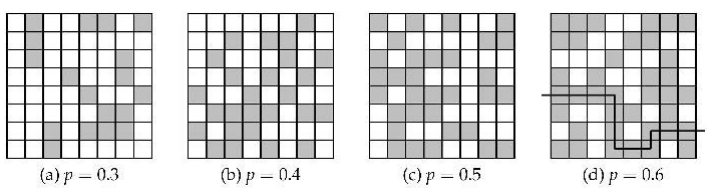


FIGURA 26 Las celdas en cada uno de estos cuatro arreglos han sido sombreadas (ocupadas) al azar. En (a), cada celda tiene un 30% de probabilidad de estar ocupada. En (d), cada celda tiene un 60% de probabilidad de estar ocupada. Incluso en (a) hay "conglomerados" — casos en los que dos o más células vecinas más cercanas están ocupadas. (El vecino más cercano de una celda es uno que está directamente encima, debajo, a la izquierda o a la derecha de la celda. En (d) hay una "expansión del grupo": un camino a través de los vecinos más cercanos desde un extremo de la matriz hasta el otro.

Teoría de la Percolación

Supongamos que cada celda de una matriz tiene una probabilidad p de ser poblada. Cada célula es independiente de las demás — el hecho de que una célula en particular esté poblada no significa que sus células vecinas tengan más o menos probabilidades de estar pobladas. Claramente, $p \times N$ de las celdas estarán pobladas y $(1 - p) \times N$ estarán vacías. Si la probabilidad p es grande, entonces la matriz contendrá muchas celdas llenas; si p es pequeño, entonces la matriz estará escasamente poblado. La Figura 26 muestra cuatro

matrices de 8 × 8 generadas por computadora. En (a) la probabilidad de ocupación de una celda es del 30%; en (b) es del 40%; en (c) es del 50% y en (d) es del 60%. (Los físicos se ocupan de simulaciones mucho más grandes que ésta, por supuesto, pero una cuadrícula de 8 × 8 está bien para propósitos de ilustración. Dos celdas ocupadas que están una al lado de la otra se llaman vecinos, y los grupos de vecinos se llaman grupos. Para la matriz bidimensional mostrada en la ilustración, cada celda, excepto las de los bordes, puede tener cuatro vecinos: las celdas directamente arriba y abajo, y a la izquierda y a la derecha. La teoría de la percolación trata principalmente de cómo estos vecinos y cúmulos interactúan entre sí, y cómo su densidad afecta el fenómeno particular que se está estudiando. Un cúmulo que abarca la longitud o el ancho (o ambos) de un arreglo es particularmente importante en la teoría de percolación. Se denomina conglomerado de expansión o conglomerado de percolación. Para una celosía infinita, un conglomerado que abarca sólo ocurre cuando la probabilidad p está por encima de un valor crítico p_c.[97]

¿Qué tiene esto que ver con la paradoja de Fermi? Bueno, si Landis tiene razón, podemos usar las bien afiladas técnicas de la teoría de percolación para simular el flujo de CETs a través de la Galaxia. Aunque los problemas de percolación son difíciles de estudiar analíticamente, pueden ser fácilmente simulados por computadora.

Los lectores con cierta experiencia en programación pueden configurar el modelo Landis y estudiar por sí mismos la distribución de las CETs bajo diferentes parámetros del modelo. La Figura 27 muestra un resultado típico.

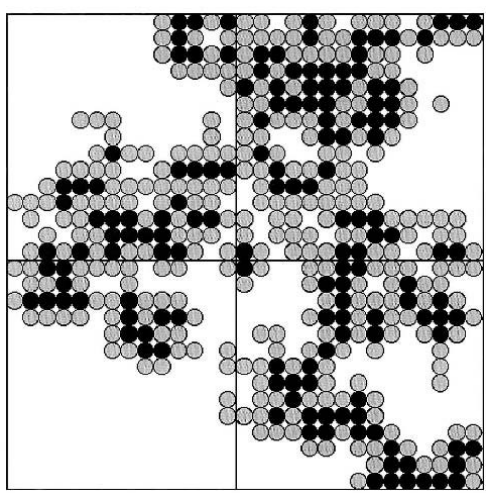


FIGURA 27 Una rebanada de una simulación de percolación típica en una simple celosía cúbica en tres dimensiones. Para esta matriz $p_c = 0.311$, *mientras que la simulación es para* $p = 0.333$. *Los círculos negros denotan sitios "colonizadores", y los círculos grises denotan sitios "no colonizadores". La ausencia de círculos denota sitios que no han sido visitados. Nótese la forma irregular del límite y los grandes huecos. ¿Acaso la Tierra yace en uno de los vacíos?*

Como en cualquier problema de percolación, la red final depende de los valores relativos de p y p_c. En el modelo de Landis, si $p < p_c$, entonces la colonización siempre terminará después de un número finito de colonias. El crecimiento ocurrirá en grupos, y el límite de cada grupo consistirá en civilizaciones no colonizadoras. Si $p = p_c$, entonces los racimos mostrarán una estructura fractal, con volúmenes tanto vacíos como llenos de espacio existente en todas las escalas. Si $p > p_c$, entonces los grupos de colonización crecerán indefinidamente, pero existirán pequeños vacíos — volúmenes de espacio que están limitados por civilizaciones no colonizadoras. Producimos un modelo de colonización de queso suizo: las civilizaciones abarcan la galaxia, pero hay agujeros.

El enfoque de percolación sugiere que los extraterrestres colonizadores no han llegado a la Tierra por una de tres razones. Primero, $p < p_c$, y cualquier colonización que haya tenido lugar se detuvo antes de que llegara a nosotros. Segundo, $p = p_c$, y la Tierra está en uno de los grandes volúmenes no colonizados del espacio que inevitablemente ocurren. Tercero, $p > p_c$, y la Tierra está en uno de los muchos pequeños vacíos desocupados. ¿Qué explicación es la más probable? Para responder a esto necesitamos saber el valor de la probabilidad de colonización p y también el número típico de estrellas disponibles para la colonización. Por supuesto, no tenemos absolutamente ninguna idea de lo que podría ser un valor razonable para p; Landis toma $p = 1$, que es tan bueno como cualquier otra estimación. En cuanto a los sitios de colonización, Landis argumenta que sólo existen candidatos adecuados alrededor de estrellas suficientemente similares al Sol (en otras palabras, estrellas de una sola secuencia principal dentro de un rango espectral restringido). A una distancia de 30 años luz de la Tierra sólo hay cinco estrellas candidatas, así que una suposición razonable para este número es 5. Estos valores producen un modelo que está cerca de ser crítico: hay grandes volúmenes colonizados de espacio e igualmente grandes volúmenes vacíos de espacio. De acuerdo con el modelo de Landis, entonces, no hemos sido visitados por las muchas CETs que existen en la Galaxia porque habitamos uno de los vacíos.

* * *

El enfoque de percolación aborda la paradoja de Fermi de una manera atractiva. En lugar de atribuir una uniformidad de motivo o circunstancia a las CETs, asume que las civilizaciones tendrán una variedad de impulsos, habilidades y situaciones. La resolución de la paradoja surge naturalmente como una posible consecuencia del modelo. Por supuesto, es posible discutir sobre los detalles del modelo; el propio Landis lo hace en su artículo. Por ejemplo, el modelo ignora el peculiar movimiento de las estrellas. Las estrellas no son fijas, como las casillas de un tablero de ajedrez, sino que se mueven relativas entre sí. Aunque el movimiento relativo de las estrellas es lento, podría afectar al modelo de percolación. También es posible sugerir

formas de mejorar el análisis. Por ejemplo, podríamos desarrollar modelos más complejos, teniendo en cuenta las fronteras galácticas, las zonas habitables y la distribución real de las estrellas. También se pueden cuestionar los supuestos básicos del enfoque de percolación. Por ejemplo, ¿es realista asumir la existencia de un horizonte lejano, más allá del cual ninguna civilización colonizará jamás? Después de todo, si una civilización puede viajar 50 años luz, ¿sería realmente mucho más difícil un viaje de 100 años luz? ¿Y qué hay de la suposición de que sólo unas pocas estrellas adecuadas estarán en el horizonte? Una civilización adecuadamente avanzada bien podría encontrar posible —de hecho preferible— construir hábitats alrededor de una variedad de tipos estelares. Además, el modelo de Landis supone que la colonización tendrá lugar directamente por los miembros de una CET. Veremos en la siguiente sección que la colonización podría tener lugar por sonda — un proceso que decididamente *no* está descrito por un modelo de percolación. Si sólo una civilización desplegara con éxito sondas para colonizar la galaxia, entonces el modelo de percolación de Landis fracasaría.

Por último, incluso si este enfoque explica por qué no hemos sido *visitados*, ¿puede explicar por qué no hemos tenido *noticias* de una CET? Esta pregunta es particularmente significativa si uno de los casos $p \geq p_c$ es cierto, y habitamos un vacío rodeado por todos lados por civilizaciones avanzadas. Incluso si las civilizaciones hijas llegan a ser independientes de sus padres, ¿desearían seguramente comunicarse con las otras? Mantenerse en contacto usando canales de radio u ópticos sería trivial comparado con el problema de viajar físicamente entre estrellas. Es difícil creer que todas estas civilizaciones viajen y luego adopten y mantengan una política de silencio. Entonces, ¿por qué no hemos escuchado sólo una de estas conversaciones? (En el modelo Landis, las CETs no deberían tener nada que temer al revelar su posición: una de las entradas al modelo es que la colonización de un sistema habitado es tan difícil que nunca tiene lugar. ¿Por qué no hemos visto un ejemplo de un proyecto de ingeniería masivo, del tipo que una CET avanzada podría emprender? La respuesta a todas estas preguntas, por supuesto, puede ser simplemente que no hemos buscado lo suficiente ni escuchado lo suficiente. Sin embargo, aunque un modelo de percolación proporciona una explicación elegante de por qué no hemos sido visitados, personalmente no me parece convincente en última instancia.

SOLUCIÓN 12: SONDAS BRACEWELL-VON NEUMANN

...miré a estos mismos cielos, y escudriñando sus inmensidades...

Robert Browning,
Nochebuena

Los viajes interestelares son ciertamente difíciles, quizás poco prácticos, pero no imposibles. Incluso con nuestro nivel actual de tecnología, la humanidad ha tenido éxito en lanzar una embarcación que algún día llegará a las estrellas. Imagínese una CET con una tecnología sólo un poco más avanzada que la nuestra; suponga que su embarcación viaja a la velocidad tranquila de, digamos, *c*/40. Entonces, si la CET hace un avance tecnológico más — el desarrollo de las sondas Bracewell-von Neumann — posee una estrategia para colonizar la galaxia. Y rápido.

* * *

De las muchas contribuciones a la ciencia hechas por von Neumann (una lista parcial está en la página 48), la más importante puede haber sido en la teoría de la computación. Se interesó por la informática en Los Álamos, donde se encargó de los cálculos necesarios para el diseño de la bomba. Se habían desarrollado máquinas de cálculo para ayudar al equipo de von Neumann en sus tareas; después de la guerra, von Neumann volvió su mente hacia lo que se requería de máquinas de computación de propósito más general. Sus consideraciones llevaron a muchos de los principios importantes de la computación, y la mayoría de las computadoras de hoy en día — que se basan en el diseño lógico general y el modo de operación que él defendió — se conocen como máquinas von Neumann.[98]

FIGURA 28 John von Neumann (derecha) en conversación con Stanislaw Ulam (centro) y Richard Feynman en Los Álamos.

Las preguntas involucradas en el diseño de una máquina de computación de propósito general llevaron a von Neumann a hacer una pregunta aún más grande: ¿Qué es la vida? Como un paso hacia la respuesta a esto, desarrolló la idea de un *autómata auto-reproductor*, un dispositivo que podría (a) funcionar en el mundo y (b) hacer copias de sí mismo. (Este dispositivo también se llama a veces "máquina von Neumann", pero esto lleva a la confusión con *la* máquina von Neumann — la arquitectura que está en el corazón de los ordenadores actuales). Usaré el término "autómata auto-reproductor" cuando me refiera a este hipotético dispositivo. En el esquema de von Neumann, el autómata tiene dos partes lógicamente distintas. Primero, tiene un *constructor*, que manipula la materia en su entorno para llevar a cabo tareas, incluyendo la construcción de unidades que luego puede usar para ensamblar una copia de sí mismo. Un constructor universal tiene la capacidad de hacer *cualquier cosa* — siempre y cuando tenga las instrucciones adecuadas. En segundo lugar, tiene un *programa*, almacenado en algún tipo de banco de memoria, que contiene las instrucciones necesarias para el constructor.

Un autómata puede reproducirse como sigue: El programa primero le dice al constructor que haga una copia de las instrucciones del programa y coloque la copia en un soporte. Luego le dice al constructor que haga una copia de sí mismo con un banco de memoria claro. Finalmente, le dice al constructor que mueva la copia del programa del soporte al banco de memoria. El resultado es una reproducción del dispositivo original; la reproducción puede funcionar en el mismo entorno que el original y es capaz de auto-reproducirse.

Por supuesto, von Neumann no dio detalles explícitos de cómo *construir* un autómata auto-reproductor. Aún hoy, estamos lejos de ser capaces de construir tal dispositivo (aunque la aparente convergencia de varias tecnologías sugiere que podríamos ser capaces de hacerlo en unas pocas décadas). Lo que le interesaba a von Neumann eran los fundamentos lógicos de los sistemas de auto-reproducción, más que cualquier mecanismo particular para lograr la reproducción. En una conferencia dada por primera vez en 1948, discutió la relevancia de los autómatas auto-reproductores para la cuestión de la vida. Argumentó que una célula viviente, cuando se reproduce, debe seguir las mismas operaciones básicas que un autómata auto-reproductor. Dentro de las células vivas, debe haber un constructor, y debe haber un programa. Él tenía razón. Ahora sabemos que los ácidos nucleicos juegan el papel del programa, y las proteínas juegan el papel del constructor. Todos nosotros somos autómatas autorreproductores. (Discutiremos la función de ácidos nucleicos y proteínas luego; ver la Solución 43). Lo que aquí nos preocupa no es lo que los autómatas autorreproductores de von Neumann puedan decirnos sobre la vida. Más bien, es cómo usar tales autómatas para colonizar la Galaxia. Frank Tipler esbozó un posible escenario.

* * *

En primer lugar, debemos recordar que el transporte de seres inteligentes para investigar los sistemas planetarios sería costoso: alimentos, agua, soporte vital — todos estos elementos son necesarios, pero requieren energía para su transporte. Las sondas no tienen este problema. De hecho, esta es la razón por la que el lema de Crick para la panspermia dirigida era "las bacterias van más allá"; una pequeña sonda llena de una carga útil de bacterias sería más barata de construir y propulsar, y permitiría a una CET sembrar la Galaxia. Con las sondas estamos en el camino correcto; pero una sonda llena de bacterias es de poca utilidad para una CET que desea explorar y aprender sobre la Galaxia. Para una CET inquisitiva, tiene más sentido lanzar *sondas Bracewell-von Neumann.* (Estos dispositivos generalmente se llaman simplemente sondas von Neumann en la literatura. Sin embargo, a mi leal saber y entender, von Neumann nunca consideró los posibles usos de las sondas en la exploración interestelar. La primera persona que sugirió que las sondas serían útiles para la exploración y comunicación interestelar fue Ronald Bracewell.[99] Parece razonable, por lo tanto, referirse a estos dispositivos como sondas Bracewell-von Neumann.

En el escenario de Tipler, una sonda Bracewell-von Neumann puede ser pequeña: la carga útil no necesita ser más que un autómata autorreproducible —uno con un constructor universal y un programa inteligente— y un sistema de propulsión básico para su uso dentro del sistema objetivo. Después de llegar a la estrella objetivo, el programa instruye a la sonda para que encuentre el material adecuado con el que pueda reproducirse y hacer copias del sistema de propulsión. (Si el sistema planetario se pareciera al nuestro, entonces habría mucha materia prima disponible para el constructor; asteroides, cometas, planetas y polvo podrían ser todos descompuestos y utilizados. Si fuera necesario, las señales de radio del planeta de origen podrían enviar revisiones al programa, para que la sonda nunca quedara desfasada. Poco después de la llegada había una gran cantidad de sondas, cada una de las cuales llevaba a cabo alguna tarea pre-programada. Algunos podrían explorar el sistema planetario, enviando datos científicos al mundo natal. Algunos podrían construir un hábitat adecuado para la posterior colonización por las especies hogareñas. Algunos pueden incluso criar miembros de la especie original a partir de embriones congelados almacenados como parte de la carga útil. Y algunos viajaban a otra estrella, donde el proceso se repetiría hasta que cada estrella de la Galaxia hubiera sido visitada.

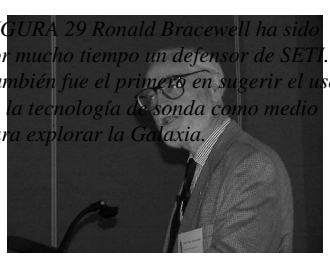


FIGURA 29 Ronald Bracewell ha sido por mucho tiempo un defensor de SETI. También fue el primero en sugerir el uso de la tecnología de sonda como medio para explorar la Galaxia.

Si las sondas viajaran entre estrellas a la velocidad más bien majestuosa de *c*/40, y si la propagación de las sondas fuera dirigida en lugar de aleatoria, entonces una ola de colonización podría surgir a través de la Galaxia en aproximadamente 4 millones de años — un período que equivale a sólo 2 horas y 46 minutos del Año Universal. Este tiempo es más corto que los tiempos de colonización en los modelos de Newman y Sagan, y Fogg, pero esto es de esperar. No es necesario que las sondas permanezcan en un sistema planetario y esperen a que los colonos les den instrucciones sobre cómo proceder: ya tienen sus instrucciones. El tiempo de colonización galáctica es corto porque el proceso está *planeado* para ser eficiente. La colonización por sonda no sólo es rápida, sino también barata. Una CET simplemente tiene que enviar las primeras sondas; después de eso, la Galaxia se encarga de proporcionar la materia prima para el proceso continuo.

¿Pueden construirse tales sondas? Bueno, los autómatas inteligentes de autorreproducción son ciertamente posibles: La naturaleza ya los ha construido en forma de seres humanos. (Como señala John Watson, ¡los humanos son un buen ejemplo de lo que esperamos de cierto tipo de sonda Bracewell-von Neumann! Tal vez no seamos una especie "natural", ¿sino la tecnología de sonda de alguna CET avanzada? Se desconoce si la humanidad puede igualar los logros de la Naturaleza, o tal vez mejorarlos y construir mejores autómatas que se reproduzcan a sí mismos. Ciertamente hay importantes obstáculos técnicos y de ingeniería que superar antes de que podamos construir sondas Bracewell-von Neumann. Pero incluso si la humanidad no es lo suficientemente brillante para desarrollar la tecnología de las sondas, seguramente una civilización tecnológica miles o millones de años más avanzada que nosotros podría construir sondas. No parece haber ninguna razón teórica por la que no pudieran hacerlo.

La colonización de la Galaxia por sonda es tecnológicamente posible; es rápida; y es barata. Incluso si el objetivo es el contacto en lugar de la colonización, Bracewell mostró que hay circunstancias en las que las sondas son más eficaces que las señales de radio. Como Fermi preguntaba: ¿dónde están las sondas?

Tocamos esta cuestión en el Capítulo 3, cuando discutimos el posible uso de sondas en la panspermia dirigida y cuando consideramos los lugares donde podría esconderse una sonda de monitorización. Pero tales sondas no son las sondas Bracewell-von Neumann que pueden desmantelar planetas, emprender proyectos de astroingeniería y colonizar la galaxia en un abrir y cerrar de ojos cosmológicos. No hay evidencia de que tales sondas hayan visitado alguna vez el Sistema Solar, ni hay evidencia de su actividad en otras partes de la Galaxia.

Incluso si una CET tiene la capacidad de construir sondas Bracewell-von Neumann, quizás elegiría no desplegar la tecnología. Después de todo, hay riesgos. Las sondas se reproducen (como seres vivos) en lugar de replicarse (como cristales), por lo que inevitablemente habrá errores reproductivos.

Habrá mutaciones. Las sondas evolucionarían, igual que las criaturas biológicas. La Galaxia podría pronto ser el hogar de diferentes "especies" de sondeo, cada una con su propia interpretación de sus objetivos. Se correría el riesgo, por ejemplo, de que una sonda regresara al sistema de origen y no lo reconociera; no son buenas noticias para la CET si las órdenes de la sonda son desmantelar planetas y utilizar el material para construir otra cosa. Pero, ¿es un riesgo que *todas las* CETs se niegan a asumir, y un problema que *ninguna* CET resuelve?

Dado que la colonización de la Galaxia por sonda parece sencilla, algunos autores argumentan que existe una fuerte motivación para que una CET participe en la colonización: si la especie A no lo hace, la especie B lo hará. En otras palabras, presente su reclamo temprano. Este tipo de argumento podría haber atraído a von Neumann, quien fue un fuerte defensor del primer ataque nuclear. (En una entrevista con un reportero de la revista *Time*, von Neumann dijo: "Si dices por qué no bombardearlos mañana, yo digo, ¿por qué no hoy? Si tú dices las cinco, yo digo a la una.") Debemos estar agradecidos de que, en las décadas de 1950 y 1960, prevaleciera un consejo más sabio que el de von Neumann. Tal vez podamos esperar que las especies inteligentes se desarrollen hasta el punto en que no tengan el impulso de poseer cada estrella, habitar cada planeta y poblar la Galaxia con seres como ellos. Sin embargo, sólo hace falta una CET para razonar que no debería correr el riesgo de perder todos los bienes inmuebles.

* * *

Una discusión de las sondas de Bracewell-von Neumann es relevante para cualquier discusión de la paradoja de Fermi, pero pueden preguntarse por qué la presento en una parte del libro dedicada a las *soluciones* de la paradoja. Un sorprendente número de personas parece creer que la tecnología de las sondas *resuelve* la paradoja. Ellos argumentan que no vemos extraterrestres porque los extraterrestres enviarían sondas en lugar de viajar distancias interestelares ellos mismos. Por supuesto, esto no tiene nada que ver. La pregunta de Fermi se refiere tanto a los alienígenas como al producto de la tecnología alienígena. Después de todo, si detectamos un objeto en el espacio que era claramente artificial pero no hecho por el hombre, entonces presumiblemente podríamos deducir la existencia de una civilización extraterrestre que construyó el objeto. No vemos evidencia de extraterrestres *ni de sus sondas*. Lejos de resolver la paradoja, la posibilidad de las sondas Bracewell-von Neumann le da un mordisco real a la paradoja.

SOLUCIÓN 13: SOMOS CHAUVINISTAS SOLARES

…los soles del hogar.

Rupert Brooke,
El Soldado

Hemos asumido implícitamente que los objetos importantes en el espacio son estrellas estables, de mediana edad, tipo G2 como el Sol y planetas acuáticos como la Tierra. Pero, ¿quién sabe dónde elegiría vivir una civilización mucho más antigua que la nuestra? Pueden requerirse condiciones similares a las de la Tierra para la génesis y la evolución temprana de la vida, pero una vez que una civilización está tecnológicamente avanzada y puede construir un hábitat para sí misma, puede que no quiera permanecer en la superficie de un planeta orbitando una estrella común como el Sol. Tendemos a pensar que a las CETs les encantaría poner sus manos (o tentáculos, o lo que sea) en la principal pieza de bienes raíces que es nuestro Sistema Solar, pero eso puede ser simplemente un reflejo de nuestro chovinismo solar. En cuyo caso los diversos modelos de colonización galáctica pueden no estar equivocados; simplemente pueden ser inaplicables.[100]

Por ejemplo, Dyson ha sugerido que una civilización K2 podría optar por desgarrar algunos de los planetas de su sistema y utilizar el material para crear una esfera que encierre a la estrella.[101] Al hacer esto, toda la producción de energía de la estrella podría ser utilizada; compárese con la situación en la Tierra, que intercepta sólo una milmillonésima parte de la energía emitida por el Sol. Si esa civilización también fuera capaz de viajes interestelares, entonces presumiblemente podría construir una esfera Dyson alrededor de cualquier estrella que visitara. Si es así, ¿por qué se molestaría con nuestro Sol, cuando hay tanta más energía disponible de estrellas de clase espectral O? Una estrella de clase espectral O5, por ejemplo, bombea 800.000 veces más energía que el Sol. Tal vez, entonces, las CETs avanzadas son nómadas, viajando de estrella tipo O a estrella tipo O en naves de generación. Podrían llegar, disfrutar de un abundante suministro de energía durante los pocos millones de años de vida de la estrella, y luego marcharse antes de que la estrella se convierta en supernova. Las brillantes estrellas de tipo O proporcionan entornos inadecuados para que la vida evolucione, porque mueren tan rápidamente, pero podrían ser la estrella preferida de las civilizaciones K2.

Alternativamente, tal vez las CETs avanzadas extraen energía del vacío cuántico o extraen energía de los agujeros negros. En este caso, ¿necesitarían estrellas? Podrían vivir en las naves de su generación, sin sentir nunca la necesidad de poner un pie (o el equivalente de un pedal alienígena) en una superficie planetaria.

En resumen, quizás la razón por la que no han estado aquí es porque hay

muchos más lugares atractivos para visitar de lo que pensamos. Si este es el caso, entonces las suposiciones hechas en los varios modelos de colonización Galáctica están incompletas, y las conclusiones pueden necesitar ser revisadas.

SOLUCIÓN 14: SE QUEDAN EN CASA....

No hay lugar como el hogar.
J. H. Payne

Uno de los acontecimientos más emocionantes de mi infancia ocurrió el 20 de julio de 1969.[102] Mi padre me despertó para ver a Neil Armstrong y a Buzz Aldrin aterrizar en la Luna. Supongo que la mayoría de la gente de mi edad sintió el mismo temor cuando vieron el Apolo 11 posarse. Más de treinta años después, nos falta la capacidad — y la motivación — para repetir la empresa. Desde que Gene Cernan sacudió el polvo lunar de sus botas en 1972, nadie ha puesto un pie en la Luna, y no hay planes definidos para que alguien lo haga. Algunos entusiastas del espacio continúan haciendo un trabajo valioso para establecer los factores necesarios para un viaje tripulado a Marte, pero es poco probable que tal viaje ocurra pronto. Una suposición compartida por muchos, incluyéndome a mí, es que especies inteligentes como la nuestra inevitablemente se expandirán al espacio — así que ¿por qué no estamos ahí fuera? Tal vez la suposición esté equivocada. Tal vez una desafortunada mezcla de apatía y economía signifique que las CET se queden en casa; tal vez esa sea la triste solución a la paradoja de Fermi.

Hay razones para esperar que la suspensión de la exploración espacial tripulada sea simplemente una pausa. A medida que la tecnología mejore, el viaje al espacio será más barato y más frecuente. Ya hemos visto al primer vacacionista espacial, Dennis Tito, y seguramente más le seguirán.[103] De hecho, la fuerza impulsora detrás de los viajes espaciales tripulados en los próximos años puede ser el turismo más que la ciencia o la industria de alta tecnología.

A largo plazo, hay una razón de peso por la que deberíamos establecer colonias independientes viables en Marte o en los hábitats de O'Neill: ayudaría a asegurar la supervivencia de la humanidad en caso de que un desastre golpeara la Tierra. En los últimos años hemos llegado a comprender lo peligroso que es el mundo en el que vivimos. Si un gran meteorito golpeara la Tierra seríamos aniquilados; si un súper volcán hiciera erupción, nuestra civilización tecnológica se desmoronaría; el cambio climático, cualquiera que sea la causa, podría destruir nuestro modo de vida. Las cosas han sido pacíficas aquí en la Tierra a lo largo de la historia humana registrada, pero nuestra historia corresponde a sólo 10 segundos del Año Universal. Creer que el mundo está tranquilo porque nunca lo hemos visto de otra manera es como tomar la actitud de un hombre que salta desde lo alto de un edificio alto y se da cuenta de que, desde que 29 de los 30 pisos han pasado sin incidentes, va a estar bien.

A largo plazo, tiene sentido establecer colonias alrededor de otras estrellas en caso de que algo le ocurra al Sol. Una eyección de masa coronal sólo unas

pocas veces más poderosa que la erupción solar más intensa registrada podría causarnos serios problemas.[104] En última instancia, si sobrevivimos lo suficiente, veremos al Sol saliendo de la secuencia principal en su camino hacia convertirse en una gigante roja — y eso realmente nos obligaría a mudarnos de casa. (Zuckerman ha demostrado que si la galaxia contiene entre 10 y 100 civilizaciones de larga vida, entonces es casi seguro que al menos una de ellas se habría visto forzada a emigrar debido a la muerte de su estrella.[105] Si existen 100.000 civilizaciones de este tipo, entonces la galaxia debería haber sido completamente colonizada por civilizaciones cuyas estrellas de origen han evolucionado a partir de la secuencia principal).

La humanidad no se ha precipitado hacia el espacio, pero seguramente es demasiado pronto para decir que nunca intentaremos viajar por el espacio. Hemos tenido la capacidad de lanzar vehículos espaciales durante sólo unas pocas décadas; en el contexto de la paradoja de Fermi tenemos que pensar en términos de miles o millones de años. Y aunque es probablemente infructuoso especular sobre los motivos de los supuestos extraterrestres, parece haber una lógica universal para el establecimiento de colonias fuera del mundo. Una especie con todos sus huevos en una cesta planetaria corre el riesgo de convertirse en una tortilla. ¿No es cierto que las CET tecnológicamente avanzadas se trasladarán al espacio, por muy vacilantes que sean?

La idea de que *todos* las CET se queden en casa me parece (al menos a mí) improbable, a menos que haya una buena razón para que se queden en casa.

SOLUCIÓN 15: ...Y NAVEGAN POR LA RED

La humanidad no puede soportar mucha realidad.
T. S. Eliot,
"Burnt Norton", *Cuatro cuartetos*

En la Solución 7 consideramos la sugerencia de Baxter de que existimos en una realidad virtual; el Universo parece desprovisto de vida porque las CETs avanzadas han diseñado nuestra realidad para hacerla aparecer de esa manera. Podemos invertir la hipótesis del planetario para dar una resolución menos paranoica a la paradoja de Fermi: quizás las CETs generan realidades virtuales para su *propio* uso. Tal vez no sabemos nada de ellos porque se quedan en casa y se comprometen con una realidad diseñada más interesante y satisfactoria que la realidad "real".

Es fácil idear escenarios en los que una CET pueda optar por desconectarse del mundo real y, en su lugar, vivir en uno virtual. Por ejemplo, supongamos que sus físicos descubren una teoría de todo, una meta que nuestros propios físicos pueden estar a sólo unas décadas de alcanzar. Supongamos que sus biólogos rastrean la vida hasta sus orígenes químicos y aprenden a manipular la materia viva a nivel bioquímico. Sus astrónomos observacionales acumulan una gran cantidad de datos sobre el Universo, sus teóricos explican cómo encajan los datos en sus modelos cosmológicos, y sus filósofos lo combinan todo en una teoría del conocimiento coherente. En resumen, supongamos que concluyen que su ciencia está terminada. Además, supongamos que la potencia de cálculo disponible para esta CET es muy superior a la nuestra: todo está cableado, y sus simulaciones de realidad virtual, que podrían alimentarse directamente en sus cerebros, proporcionan experiencias sensoriales satisfactorias. Finalmente, ¿qué pasaría si tal civilización decidiera que los viajes interestelares, aunque posibles, son demasiado difíciles o costosos para valer la pena el esfuerzo? Quizás, bajo esas circunstancias, dejarían de explorar. Podrían investigar realidades artificiales.

No tenemos ni idea de si tal escenario es probable. Por ejemplo, uno podría argumentar que nunca habrá un final al proceso de la ciencia; siempre habrá algún conocimiento nuevo para que una civilización lo descubra, nuevas perspectivas intelectuales para explorar. Pero es igualmente posible que el Universo obedezca a un pequeño conjunto de leyes, y que los fenómenos que surgen de esas leyes sean relativamente pocos en número; en cuyo caso una sociedad tecnológica de larga vida podría eventualmente encontrar que su ciencia es esencialmente completa. (Aunque, por supuesto, siempre hay que considerar el arte además de la ciencia.)

Del mismo modo, se podría argumentar que es imposible generar realidades virtuales tan convincentes como la realidad en la que vivimos. Recordemos nuestra discusión sobre la hipótesis del planetario, en la que

considerábamos la potencia de cálculo necesaria para generar una realidad virtual lo suficientemente precisa como para engañar a una civilización como la nuestra. Las demandas de computación eran enormes, y la potencia de computación requerida para engañar a una civilización avanzada podría ser imposible de lograr. Pero los dos casos no son equivalentes. La potencia de cálculo necesaria para generar una realidad virtual que satisfaga a los participantes es mucho menor que la necesaria para engañar a la humanidad. En otras palabras, los diseñadores de la simulación podrían tomar atajos. No habría necesidad de calcular los billones de interacciones en un experimento de física de partículas; no habría necesidad de simular los resultados de los cálculos de plegado de proteínas; no habría necesidad de presentar los resultados de las observaciones de microlente gravitacional. Sus científicos ya habrían generado ese conocimiento en el Universo "real". Los diseñadores de simulaciones podrían concentrarse en generar simulaciones satisfactorias y convincentes de objetos y situaciones en la escala relativamente restringida que habitan los seres inteligentes (creemos). Esto no quiere decir que las simulaciones deban ser restringidas en su alcance imaginativo: las situaciones a ser simuladas pueden ser verdaderamente extrañas. Pero los participantes de la realidad virtual no estarían "pateando los muros" de la realidad como lo hacen los científicos y exploradores. Todo lo que se requiere es que las simulaciones satisfagan a los participantes. Por lo tanto, la potencia de cálculo necesaria es mucho menor que la necesaria para crear un planetario de Baxter a gran escala.

Mi suposición es que, si nuestra propia tecnología lo permitiera, una gran parte de la humanidad preferiría vivir en una realidad virtual. Algunas personas ya pasan horas navegando por Internet y prefieren que la interacción con otros sea mediada por el ordenador. Si las simulaciones pudieran proporcionarnos una experiencia sensorial segura pero perfecta de caminar sobre la superficie de Marte, o cazar dinosaurios, o marcar el gol de la victoria en una final de Copa, entonces creo que la mayoría de nosotros pasaríamos nuestro tiempo en esas simulaciones. Sería infinitamente mejor que la televisión — y consideremos cuánto tiempo perdemos en eso.

El escenario de una civilización quedarse-en-casa-navegar-la-Red me parece un futuro incómodamente plausible para la humanidad, pero no es el único que resuelve la paradoja de Fermi. Es un ejemplo de una condición sociológica que debe aplicarse a *todas* las especies tecnológicas para que funcione. Puede que al final *prefiramos* la realidad virtual, pero ¿por qué el aislamiento debería ser una característica universal de las especies inteligentes? Así como algunos de nosotros preferimos interactuar con humanos de carne y hueso, así también seguramente algunas civilizaciones desearían interactuar con otras. Seguramente *algunas* CETs elegirían explorar, ya sea directamente o por sondeo.[106] O, si los viajes interestelares resultan imposibles, ¿al menos no intentarían comunicarse?

SOLUCIÓN 16: ESTÁN EMITIENDO SEÑALES PERO NO SABEMOS CÓMO ESCUCHAR

El mundo debería escuchar entonces — ¡como yo estoy escuchando ahora!

Percy Bysshe Shelley,
A una alondra.

Quizás el viaje interestelar a gran escala es inalcanzable, ya sea para naves con tripulación o para sondas. Esto explicaría por qué no hemos sido *visitados*, pero no por qué no hemos *sabido* nada de ellos. Preguntó simplemente Fermi: "¿Dónde están todos?" La pregunta se refiere a algo más que a la mera ausencia de visitantes; se refiere a la ausencia de cualquier prueba de que existan.

Si los viajes interestelares son realmente inalcanzables —algo que presumiblemente las CETs descubrirían rápidamente-, ¿por qué deberían esconderse? Una CET no tiene por qué temer la invasión de un vecino agresivo, ya que cualquier vecino estaría demasiado lejos para ser una amenaza. No tienen nada que perder con las señales, y la recompensa potencial es enorme: diálogos mutuamente satisfactorios con civilizaciones igualmente avanzadas. Además, las telecomunicaciones son más baratas que los viajes. (Es más probable que utilice el teléfono o el correo electrónico para mantenerse en contacto con los parientes de las antípodas que viaje allí en avión. Pero si las civilizaciones avanzadas están ahí fuera, educándose unas a otras, cotilleando, manteniendo conversaciones que son el equivalente galáctico de la Mesa Redonda Algonquina — entonces ¿por qué no las escuchamos de vez en cuando?

Una respuesta extremadamente plausible es que no sabemos cómo una CET elegiría enviar una señal. Por lo tanto, no sabemos *cómo* escuchar.

Es cierto que no podemos saber qué tecnologías de la comunicación pueden poseer las CETs. Como señaló mi editor, si un ingeniero de radio de 1939 fuera transportado de alguna manera a la Nueva York de 2002, podría construir un receptor de radio y llegar a la conclusión de que casi no se hacían transmisiones de radio útiles: no sabría nada de FM. Del mismo modo, sería felizmente inconsciente de los dispositivos de comunicación que emplean láseres, fibra óptica o satélites geosincrónicos. Por lo tanto, es presumido suponer que podemos saber qué canales de comunicación están disponibles para una cultura técnica que puede estar un millón de años por delante de la nuestra. Si quisieran hablar entre ellos en secreto (tal vez no quisieran influir en el desarrollo de especies jóvenes como la nuestra), entonces presumiblemente podrían mantener el secreto sin dificultad. Pero las cosas son muy diferentes si *quieren* ser escuchadas, y escuchadas ampliamente. Podemos asumir que cada civilización debe obedecer las leyes de la física;

además, cualquier CET sabrá que otras CETs deben obedecer esas mismas leyes. Dado que todos tenemos que pagar nuestras facturas de energía, el número y los tipos de señales que razonablemente se pueden enviar son bastante restringidos. Examinemos las ventajas y desventajas de cuatro métodos de comunicación: señales que utilizan ondas electromagnéticas, ondas gravitacionales, haces de partículas y haces de taquiones hipotéticos.

Señales electromagnéticas

La forma obvia de enviar información es a través de la radiación electromagnética (EM). No sólo se propaga a *c*, la velocidad más rápida posible, sino que también se propaga a distancias interestelares e intergalácticas. (Sabemos que las señales EM pueden operar a distancias interestelares porque los objetos naturales indican su presencia de esta manera en vastas extensiones del espacio. La astronomía es esencialmente la ciencia de la grabación e interpretación de estas señales. Utilizamos luz visible cuando miramos las estrellas con nuestros ojos o las fotografiamos con telescopios ópticos. Usamos ondas de radio cuando estudiamos el cielo con radiotelescopios. Cada vez utilizamos más las longitudes de onda infrarrojas, ultravioletas, de rayos X y gamma, especialmente en experimentos satelitales. Si podemos estudiar objetos naturales a distancias interestelares usando la radiación EM que emiten, entonces presumiblemente podemos hacer lo mismo con objetos artificiales.

Durante muchos años, la suposición de trabajo de los investigadores que buscan CETs es que las civilizaciones tecnológicas construirán potentes transmisores EM, emitirán una señal y la modularán para transmitir información útil — quizás, si tenemos suerte, emitirán su "Enciclopedia Galáctica". En la siguiente sección discutiré en detalle cómo podemos detectar señales EM intencionadas. Aquí, quiero argumentar que incluso puede ser posible detectar la radiación EM que lleva al descubrimiento de marcadores o faros *inadvertidos* de las civilizaciones K2. (Detectar marcadores inadvertidos de una civilización K3 podría ser aún más fácil.) Incluso un faro inadvertido transmitiría una tremenda cantidad de información: que la vida existe en otro mundo, que está tecnológicamente avanzada, la ubicación de ese mundo, y así sucesivamente.

Ya hemos discutido por qué las civilizaciones K2 podrían construir las esferas de Dyson. Una esfera Dyson irradiaría tanta energía como la estrella central —la energía tiene que ir a alguna parte— pero presumiblemente lo haría en el infrarrojo. En esencia, la esfera irradiaría porque es cálida — alrededor de 200-300 K. Por lo tanto, una forma de buscar una CET sería buscar fuentes infrarrojas brillantes a una longitud de onda de alrededor de 10 micras: tales fuentes podrían ser el calor residual de los proyectos de astroingeniería.

Una búsqueda por astrónomos japoneses de fuentes infrarrojas artificiales a

una distancia de 80 años luz no encontró firmas plausibles de las esferas de Dyson.[107] Aunque varias estrellas muestran un gran exceso de emisión en el infrarrojo, esto se debe a que están envueltas en polvo. Sin embargo, no podemos concluir de esto que no hay CETs dentro de 80 años luz; las CETs pueden elegir no construir esferas Dyson allí por una variedad de razones. Incluso si las esferas de Dyson son comunes, las civilizaciones *realmente* avanzadas — como Marvin Minsky señaló[108] — considerarían que la radiación a cualquier temperatura por encima de la temperatura de fondo cósmica de 3 K es derrochadora. Tal vez una CET lo suficientemente avanzada como para construir una esfera Dyson es lo suficientemente avanzado como para exprimir hasta la última gota de trabajo útil de la radiación de una estrella, dejando el calor residual a 4 K. Quizás deberíamos buscar puntos en el espacio que posean un pequeño exceso de temperatura sobre el fondo del microondas.

En 1980, Whitmire y Wright dieron otro ejemplo de cómo los faros inadvertidos pueden ser transmitidos por radiación electromagnética.[109] Preguntaron qué pasaría si una civilización utilizara reactores de fisión como fuente de energía durante largos períodos de tiempo. Uno de los problemas de los reactores de fisión es la necesidad de eliminar de forma segura los residuos radiactivos. Y uno de los métodos de eliminación propuestos es lanzarlo al Sol (aunque a mí, por mi parte, no me encantaría demasiado la perspectiva de tener toneladas de desechos radiactivos posadas encima de un cohete químico). Si una CET utilizara su estrella como vertedero de residuos radiactivos, el espectro de la estrella podría presentar características que no serían fácilmente interpretadas como naturales. Por ejemplo, si vimos un espectro estelar que contenía grandes cantidades de los elementos praseodimio y neodimio, entonces nuestro interés sería capturado. Además, la alteración del espectro no sería un breve parpadeo; las pruebas espectrales de su política de eliminación de residuos nucleares serían visibles durante miles de millones de años. (Una civilización podría alterar deliberadamente [110]el espectro de su estrella de esta manera para crear un faro. Esta posibilidad fue sugerida por primera vez por Drake. Philip Morrison sugirió otro método de usar la estrella de origen como faro: poner una gran nube de pequeñas partículas en órbita alrededor de la estrella de tal manera que la nube corte la luz de la estrella para un espectador que está en el plano de la órbita de la nube. Mueva el plano de la nube y el espectador distante verá el destello de la estrella encendida y apagada. Las estrellas variables se alteran naturalmente en brillo, pero si la estrella destellara en un patrón que representara números primos, por ejemplo, entonces el espectador distante podría descartar rápidamente un fenómeno natural.[111])

Hasta ahora, no se han identificado balizas EM — inadvertidas o no.

Señales gravitacionales

Además del electromagnetismo, la única otra fuerza que conocemos que actúa sobre distancias astronómicas es la gravedad. También se propaga a la velocidad de la luz, así que quizás las CETs ¿podrían usar ondas gravitacionales para señalarse unas a otras?

La gravedad, sin embargo, es una fuerza mucho más débil que el electromagnetismo. Para construir un transmisor de ondas de gravedad hay que ser capaz de tomar grandes masas (del orden de una masa estelar) y sacudirlas violentamente. Es discutible si una civilización K2 poseería tal tecnología. Una civilización K3 podría ser capaz de construir un transmisor de ondas de gravedad, pero ¿por qué se molestaría cuando las ondas EM hacen el trabajo igual de bien y los transmisores EM son tan fáciles de construir?

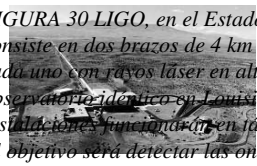


FIGURA 30 LIGO, en el Estado de Washington, consiste en dos brazos de 4 km en ángulo recto, cada uno con rayos láser en alto vacío. Hay un observatorio idéntico en Louisiana, y las dos instalaciones funcionarán en tándem. El objetivo será detectar las ondas de gravedad buscando cambios de longitud mil veces más pequeños que un núcleo atómico.

El problema complementario de la detección de las ondas gravitacionales es también mucho más difícil que el problema equivalente de la detección de las ondas EM. Es tan difícil, de hecho, que la ciencia terrestre todavía no ha construido un detector de ondas gravitacionales que funcione. (Los detectores como el LIGO pronto se pondrán en línea, pero incluso si tienen éxito tendrán la sensibilidad para detectar ondas gravitacionales de los fenómenos astronómicos más violentos. Los detectores recolectarán datos científicos excepcionalmente interesantes, pero no encontrarán señales moduladas. Por lo tanto, dadas las dificultades de transmitir y recibir ondas gravitacionales, parece poco probable que una CET las utilice para la comunicación.

Partículas Señales

Los rayos cósmicos, en forma de electrones, protones y núcleos atómicos, pueden alcanzar la Tierra a distancias interestelares, y la astronomía de rayos cósmicos es un campo de investigación próspero. Sin embargo, partículas cargadas como éstas constituirían una mala elección de canal de comunicación porque una civilización transmisora no podría garantizar dónde terminarían las partículas: los retorcidos campos magnéticos a través de la Galaxia hacen que los caminos de estas partículas sean bastante tortuosos. Los neutrinos son eléctricamente neutros, por lo que a primera vista parecen una mejor opción para un canal de comunicación. Desafortunadamente, los neutrinos son difíciles de estudiar porque reaccionan con tan poca frecuencia con la materia; ¡típicamente, un neutrino pasará a través de 1000 años luz de plomo antes de detenerse! Sin embargo, a pesar de las tremendas dificultades involucradas, los astrónomos han desarrollado telescopios de neutrinos. [112]

Telescopios de Neutrino

El primero de estos telescopios fue desarrollado por Ray Davis, quien quería estudiar los neutrinos que se generan en las reacciones de fusión nuclear en el corazón del Sol. Su telescopio era en esencia una cuba de 450.000 litros de percloroetileno (líquido de limpieza en seco) enterrada casi una milla debajo de la tierra en la mina de oro Homestake en Dakota del Sur. Era el telescopio más extraño que jamás se había construido (hoy en día hay telescopios más extraños), pero la configuración era necesaria porque los neutrinos son muy difíciles de conseguir. La mina profunda protegió la cuba de otras partículas subatómicas que bombardean la Tierra; el líquido de limpieza en seco proporcionó suficientes átomos de cloro para garantizar un número detectable de neutrinos.

La teoría predijo que cuando un núcleo de cloro capturaba un neutrino se convertiría en un núcleo de argón radioactivo. Así que al detectar átomos de argón, Davis pudo detectar neutrinos solares. De los 1.0^{21} neutrinos que pasaban a través de la cuba cada día, la teoría sugería que deberían tener lugar 6 eventos; pero el experimento encontró sólo 2 eventos por día. El experimento de Davis continúa detectando neutrinos solares, pero sólo un tercio del número esperado — un hallazgo que es de gran importancia para la física de partículas.

FIGURA 31 Una visión profunda de realidad virtual del telescopio de neutrinos Antares de 0,1 km^2, que estará situado bajo el Mediterráneo. Detectores similares están situados en los pozos de las minas y debajo de las montañas.

En febrero de 1987, el detector de Kamiokande en Japón y el detector IMB en América entre ambos detuvieron 20 neutrinos en un período de pocos segundos. Esos neutrinos fueron producidos en la famosa supernova de ese mes: SN1987A. Ahora, SN1987A ocurrió en la Gran Nube de Magallanes, a unos 170.000 años luz de distancia. Demostrablemente, entonces, es posible que los neutrinos viajen distancias interestelares, incluso intergalácticas, y que una civilización tecnológica primitiva como la nuestra los detecte. ¿Quizás las CETs usan haces de neutrinos modulados para comunicarse entre sí? Bueno, tal vez. Pero de nuevo tenemos que preguntarnos por qué harían esto cuando las ondas electromagnéticas hacen el trabajo mucho mejor y mucho más barato.

Señales de taquión

Podemos especular que las CETs extremadamente avanzadas utilizarán taquiones para señalarse unas a otras. Si existen taquiones, y si es posible modular un haz de ellos para llevar señales, entonces sin duda serán una opción atractiva para la comunicación interestelar. La comunicación basada en taquiones evitaría esa irritante demora entre hacer una pregunta y recibir una respuesta, una demora que puede ser de cientos o miles de años. Desafortunadamente, como vimos anteriormente (ver página 105), no hay absolutamente ninguna evidencia de que los taquiones existan, mucho menos de que sea posible usarlos para enviar señales.

* * *

Quizás hay muchas civilizaciones por ahí, comunicándose entre sí usando ondas gravitacionales, neutrinos y taquiones. O quizás envían señales usando técnicas con las que aún no hemos soñado — técnicas que no rompen las leyes de la física, pero que son tan exóticas para nosotros como lo serían los canales de comunicación de fibra óptica para un ingeniero de radio de 1939. Puesto que no podemos detectar tales señales, explicaría por qué no hemos oído hablar de ellas; explicaría el "gran silencio", sino toda la paradoja de Fermi.

Por otro lado, incluso para civilizaciones avanzadas, la comunicación por ondas EM parece ser una opción lógica: Las señales EM son baratas de producir, el mensaje se mueve tan rápido como es posible en un Universo relativista, y las señales son fáciles de recibir. Si una CET *quisiera* dar a conocer su presencia a otras civilizaciones quizás menos desarrolladas (civilizaciones como la nuestra, que sólo pueden escuchar señales electromagnéticas), entonces el espectro EM podría ser su única opción.

Por estas razones, aunque pueda parecer engreído y pueda significar que nos estamos perdiendo de conversaciones galácticas, muchos físicos argumentarían que sabemos cómo escuchar las señales de la civilización extraterrestre: deberíamos escuchar su radiación EM. (De hecho, dado el nivel de nuestra tecnología actual, no tenemos otra opción que tratar de detectar tal radiación. Pero, ¿a qué frecuencia debemos escuchar?

SOLUCIÓN 17: ESTÁN EMITIENDO SEÑALES PERO NO SABEMOS QUÉ FRECUENCIA ESCUCHAR

57 canales y nada encendido.
Bruce Springsteen

Si las CET utilizan la radiación EM para comunicarse entre sí o para notificar su presencia a civilizaciones menos avanzadas, entonces hay varios tipos diferentes de señales que podríamos buscar.

El tipo de señal más fácil de detectar sería aquella que una CET nos ha dirigido deliberadamente. No es demasiado arrogante de nuestra parte suponer que una CET cercana enviaría señales hacia el Sol. Las civilizaciones avanzadas clasificarían al Sol como un buen candidato para poseer planetas portadores de vida, y probablemente podrían detectar la existencia de la Tierra sobre distancias interestelares. Con nuestro nivel actual de tecnología podemos detectar planetas del tamaño de Saturno alrededor de otras estrellas, así que las CETs avanzadas podrán hacerlo mucho mejor. Si emiten señales para apuntar a las estrellas con la esperanza de hacer contacto, entonces nuestro Sol estaría en su lista. (Al releer este párrafo, algunas de las afirmaciones suenan demasiado definitivas. Estamos en el reino de tratar de adivinar los motivos e intenciones de los supuestos extraterrestres — una empresa llena de riesgos. Pero tenemos que empezar por algún lado.)

Un segundo tipo de señal sería una señal destinada a la comunicación, pero dirigida a otra parte, una señal que sin embargo podríamos escuchar por casualidad. Otro tipo de señal sería una que no está destinada a la comunicación en absoluto, sino que se filtra de otras actividades — al igual que las señales EM se filtran de la Tierra debido a nuestras transmisiones de radio y televisión, y nuestro uso de radares militares. (Tales señales han estado filtrándose de la Tierra durante varias décadas, pero los desarrollos en los sistemas de telecomunicaciones por cable y satélite sugieren que podrían cesar pronto). Tal vez lo mismo sea cierto para las CETs, y el período durante el cual una civilización tecnológica es "radio-brillante" puede medirse en décadas, en cuyo caso no tenemos esencialmente ninguna posibilidad de descubrir este tipo de señal. Por otro lado, tal vez los futuros desarrollos tecnológicos —satélites solares que envían energía de vuelta al planeta de origen en forma de microondas, tal vez, o balizas de navegación para navegar a través de un sistema planetario abarrotado— filtrarían radiación electromagnética al espacio.

Con nuestro nivel actual de tecnología, tiene poco sentido buscar radiación de fuga. Debemos hacer las cosas fáciles antes de intentar proyectos más difíciles, y es más fácil detectar la radiación destinada a la comunicación. ¿Pero a qué longitud de onda elegirán transmitir las CETs? En otras palabras: ¿con qué frecuencia debemos escuchar?

* * *

El espectro EM es extremadamente amplio. La luz visible, que oscila entre $7{,}5 \times 10^{14}$ Hz (violeta intenso) y $4{,}3 \times 10^{14}$ Hz (rojo), forma una minúscula parte del espectro. Los rayos ultravioleta, los rayos X y los rayos gamma tienen frecuencias progresivamente más altas, alcanzando hasta 3×10^{19} Hz o más. Los infrarrojos, las microondas y las ondas de radio tienen frecuencias progresivamente más bajas, llegando hasta 10^{8}Hz. Nuestra tecnología emplea todas estas longitudes de onda para una variedad de propósitos, que van desde aplicaciones médicas (frecuencias de rayos X) hasta dispositivos domésticos (los abridores de puertas de garaje funcionan a 40 MHz, por ejemplo, y los monitores de bebés a 49 MHz). Parece que hay una frecuencia para todo. Entonces, ¿cuál es la mejor frecuencia para la comunicación interestelar?

A finales de la década de 1950, Philip Morrison y su colega Giuseppe Cocconi estuvieron entre los primeros en considerar esta cuestión. Los astrónomos ya habían desarrollado radiotelescopios y los estaban usando para hacer descubrimientos significativos. Fue en este contexto que Morrison investigó la posibilidad de utilizar los rayos gamma como una ventana diferente en el Universo. Como parte de este trabajo mostró cómo los rayos gamma, a diferencia de la luz visible de las estrellas, podían viajar a través del polvoriento plano de la galaxia. Le dijo a Cocconi sobre este resultado, y su colega señaló que los físicos de partículas ya generaban haces de rayos gamma en sus sincrotrones; ¿por qué no enviar el haz al espacio y ver si una CET podía detectarlo? Era una pregunta fascinante, y llevó a Morrison a pensar en las perspectivas de la comunicación interestelar. Respondió que deberían considerar no sólo los rayos gamma, sino todo el espectro electromagnético —desde las ondas de radio hasta los rayos gamma— y elegir la banda más efectiva para la señalización.

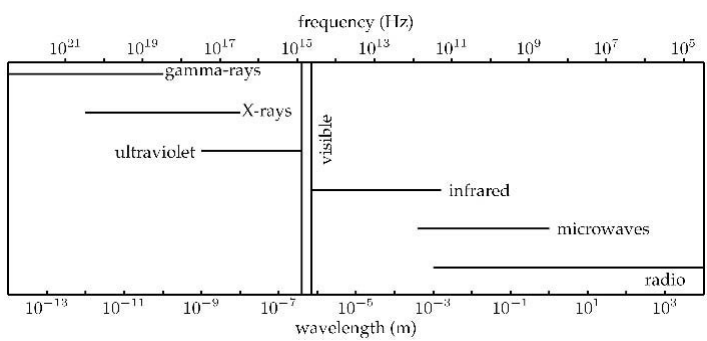


FIGURA 32 Las longitudes de onda y frecuencias del espectro electromagnético. Las líneas horizontales aparecen en una escala logarítmica: cada "tic" corresponde a un factor de diez. De este diagrama se desprende claramente que la luz visible corresponde sólo a una pequeña fracción del espectro electromagnético.

Rápidamente concluyeron que la luz visible era una mala opción para la señalización, ya que las señales tendrían que competir con la luz de las estrellas; los telescopios de rayos gamma no eran factibles en ese momento; la

banda de radio parecía ser la mejor opción. La antena parabólica de Arecibo en Puerto Rico era el instrumento apropiado para buscar señales: calcularon que si una CET tenía su propia antena parabólica de Arecibo y la utilizaba para transmitir un haz dirigido a una frecuencia fuertemente sintonizada, entonces nuestro Arecibo podía detectar la antena parabólica alienígena desde la mitad de la galaxia.[113]

Reducir la búsqueda a la banda de radio fue un gran avance, pero aún así dejó muchas frecuencias posibles. Las ondas de radio pueden estar en cualquier lugar entre 1 MHz y 300 GHz.[114] Esto es una mala noticia, por la siguiente razón. Si una CET desea transmitir una señal a grandes distancias, necesita enviar una señal de banda estrecha — una señal a una frecuencia precisa — ya que las señales de banda ancha se confunden fácilmente con ruido de fondo. (Cuando haces girar el dial de una radio, escuchas el silbido de fondo de ruido de banda ancha entre las señales de banda estrecha de las estaciones de radio. La frecuencia más estrecha generada naturalmente es por un máser interestelar. Tiene un ancho de aproximadamente 300 Hz; cualquier cosa mucho más estrecha que esto es candidata para una señal artificial. Supongamos, entonces, que las CETs transmiten señales con un ancho de banda de 0,1 Hz. (Tiene poco sentido transmitir a distancias interestelares con un ancho de banda inferior a 0,1 Hz, ya que los electrones en las nubes interestelares tienden a dispersar la señal. Esto significa que tenemos un gran número de canales de radio para buscar. A menos que reduzcamos la búsqueda aún más (o tengamos mucha suerte) podríamos estar buscando por mucho tiempo.

Cocconi y Morrison señalaron que a frecuencias inferiores a 1 GHz la Galaxia es ruidosa. No tiene mucho sentido enviar una señal a una frecuencia inferior a 1 GHz porque el ruido de fondo la ahogaría. Por otro lado, a frecuencias superiores a unos 30 GHz, la atmósfera de la Tierra se vuelve ruidosa. Si una CET emitiera a frecuencias superiores a 30 GHz, es poco probable que detectemos la señal debido a la interferencia atmosférica. De hecho, la región más silenciosa está entre 1 GHz y 10 GHz. Cocconi y Morrison sugirieron que tiene más sentido buscar señales de radio en esa región, donde realmente destacaría una señal artificial.

Refinaron aún más la gama de frecuencias. Señalaron que las nubes de hidrógeno neutro —el elemento más simple y común del Universo— emiten una fuerte radiación a 1,42 GHz. Todo observador inteligente en el Universo sabrá de la línea de hidrógeno. Tiene sentido mirar allí. Poco después, se descubrió que el radical hidroxilo irradia prominentemente a 1,64 GHz. El hidrógeno, H, y el hidroxilo, OH, juntos forman el agua compuesta: HOH — o H_2O. Ahora bien, el agua, por lo que sabemos, es absolutamente necesaria para la existencia de la vida. Encuentra agua, y tendrás la oportunidad de encontrar vida. Y puesto que la región entre 1,42 y 1,64 GHz es la parte más silenciosa del espectro radioeléctrico, parece un lugar lógico para que una civilización emita si quiere llamar la atención. Esta banda ha sido apodada la

charca. Es un nombre hermoso, que evoca visiones de muchas especies diferentes que se juntan en una fuente de agua que da vida.

FIGURA 33 El radiotelescopio de Arecibo, ubicado en Puerto Rico, es una estructura enorme. El plato en sí tiene 305m de diámetro, 51m de profundidad, y cubre un área de aproximadamente 8 hectáreas. Este telescopio podría detectar una transmisión alienígena desde el otro lado de la galaxia.

* * *

Casi al mismo tiempo que Cocconi y Morrison presentaron razones teóricas para escuchar en la región de longitud de onda larga cerca de la línea de hidrógeno, Frank Drake estaba haciendo exactamente eso: escuchar señales cerca de la línea de hidrógeno. Drake había construido equipos para estudiar esta parte del espectro radioeléctrico con fines astronómicos, pero tenía un interés permanente en la posibilidad de vida extraterrestre. Utilizó el radiotelescopio de Green Bank para escuchar las señales de dos estrellas, Tau Ceti y Epsilon Eridani. Su proyecto Ozma fue la primera vez que la humanidad buscó una CET. Aunque los resultados fueron negativos, las observaciones de Drake — junto con el documento de Cocconi-Morrison — resultaron ser un hito para el SETI.

FIGURA 34 Frank Drake es una figura sobresaliente en el campo SETI. Además de la ecuación homónima de Drake, es conocido por llevar a cabo la primera búsqueda por radio de una CET.

La situación parece ahora mucho más complicada que hace cuatro décadas

para Drake, Cocconi y Morrison. Sólo conocían una línea espectral, la línea de hidrógeno, así que la elección de dónde buscar parecía bastante clara. Los astrónomos modernos, sin embargo, son conscientes de decenas de miles de líneas espectrales que emanan de más de 100 tipos de moléculas en el espacio interestelar. Hay muy buenos argumentos para estudiar otras frecuencias. (Ejemplos importantes incluyen 22,2 GHz, que corresponde a una transición de la molécula de agua, y múltiplos simples de la frecuencia de la línea de hidrógeno — dos veces la frecuencia de la línea de hidrógeno, π veces la frecuencia de la línea de hidrógeno, y así sucesivamente. Existe una frecuencia "natural" particularmente atractiva para la comunicación intergaláctica, de la que hablaré más adelante.[115] Aunque muchos autores sostienen que la charca es el lugar "natural" para buscar señales dentro de nuestra Galaxia, es posible que eventualmente nos veamos forzados a buscar a través de toda la ventana de 1 a 30 GHz.

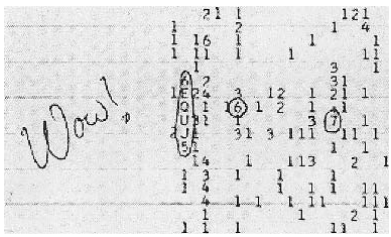


FIGURA 35 La famosa señal "Wow". El Observatorio Orejas Grandes de la Universidad del Estado de Ohio *escaneó 50 canales y grabó las observaciones en una hoja impresa. Para cada canal apareció una lista de letras y números en la impresión. En el sistema Big Ear, los números del 1 al 9 representaban un nivel de señal por encima del ruido de fondo. Para señales fuertes, se utilizaron letras (siendo Z más fuerte que A). En la noche del 15 de agosto de 1977, Jerry Ehman vio los caracteres "6EQUJ5" en el canal 2. Esta señal comenzó desde aproximadamente el nivel de fondo, subió hasta el nivel U, y luego disminuyó hasta el nivel de fondo en 37 segundos. Así era exactamente como podría ser una señal extraterrestre; Ehman rodeó a los caracteres y escribió "¡Wow!*

En más de 40 años de escucha, ninguna de las búsquedas radiofónicas ha encontrado una señal extraterrestre de origen claramente artificial. Esto no quiere decir que no se hayan encontrado señales, por supuesto. (El propio Drake detectó una señal procedente de la dirección general de Epsilon Eridani, pocas horas después del inicio del Proyecto Ozma. Sin embargo, investigaciones posteriores demostraron que la señal era claramente de origen terrestre. Las búsquedas de radio han detectado muchas señales, muchas de ellas bastante intrigantes. La famosa señal "¡Wow!" es típica de las mejores señales encontradas hasta ahora. Era un potente pico de banda estrecha, con características que indicaban que casi con toda seguridad venía del espacio, pero cuando Oreja Grande escuchó de nuevo esa parte del cielo la señal había desaparecido. Varios intentos de reubicar la señal de "¡Wow!" han fallado. Recientemente, por ejemplo, las búsquedas con el *Very Large Array* permitieron a los astrónomos investigar dos hipótesis con respecto a la señal. Primero, quizás vino de una transmisión débil pero constante, que momentáneamente se incrementó en fuerza debido al centelleo (como el centelleo de una estrella). Segundo, quizás la señal era un pulso poderoso,

diseñado para atraer la atención a una señal continua mucho más débil. Ambas posibilidades parecen haber sido eliminadas. No se encontró nada interesante, hasta un nivel 1000 veces más débil que la señal original.

La señal de "¡Wow!" puede haber emanado de una civilización distante, un rayo que se cruzó en el camino de la Tierra una noche de agosto y luego se movió. Pero parece mucho más probable que la señal provenga de un satélite artificial.[116]

Proyectos SETI

Desde el Proyecto Ozma ha habido más de 60 proyectos SETI, la mayoría de los cuales han buscado en la región del pozo de agua. En los últimos años, los proyectos se han vuelto cada vez más sofisticados. El proyecto META (*Million-channel Extra-Terrestrial Array* – Grupo de un millón de canales Extraterrestres), desarrollado en 1985 por Paul Horowitz[117], podría estudiar un millón de canales a la vez en la región de las charcas. En 1990, META II comenzó a buscar en el cielo del sur, monitoreando 8 millones de canales extremadamente estrechos de 0.05-Hz cerca de la línea de hidrógeno a 1.42 GHz, y también al doble de esta frecuencia, 2.84 GHz. En 1995, Horowitz inició el Proyecto BETA (*Billion-channel Extra-Terrestrial Array* – Grupo de mil millones de canales Extraterrestres), que explora la región del pozo de agua a una resolución de 0,5 Hz. ¡De META a BETA en sólo diez años es un progreso significativo! Proyecto SERENDIP (*Search for Extraterrestrial Radio Emissions from Nearby Developed Intelligent Populations* — Búsqueda de Emisiones de Radio Extraterrestres de Poblaciones Inteligentes Desarrolladas Cercanas) a cuestas en radiotelescopios que están siendo usados para otros propósitos astronómicos. La desventaja de este enfoque es que no hay opción sobre dónde escuchar; sólo puede buscar señales hacia donde el telescopio está apuntando. Por otro lado, como no interfiere con el funcionamiento normal del telescopio, el proyecto puede ser ejecutado de manera continua.[118] La encarnación actual del proyecto en el telescopio de Arecibo y busca 168 millones de canales, cada uno de 0.6 Hz de ancho, cerca de 1.42 GHz. SERENDIP del Sur a cuestas en el Observatorio Parkes en Australia para buscar en el cielo del sur, también en la línea de hidrógeno. El proyecto Phoenix, que comenzó en febrero de 1995, está a mitad de camino en la búsqueda de señales dentro del rango de 1,2 a 3,0 GHz en canales de tan sólo 0,7 Hz de ancho.

A pesar de la creciente sofisticación de la radio SETI, la clasificación a través de miles de millones de canales con la esperanza de encontrar una señal sigue siendo una tarea laboriosa. ¿Realmente no hay alternativa a la parte de microondas/radio del espectro electromagnético? Sucede que sí la hay.

Más o menos al mismo tiempo que Cocconi y Morrison sugirieron escuchar las transmisiones de radio, Arthur Schawlow y Charles Townes

esbozaron los principios de funcionamiento de los láseres. Los primeros dispositivos eran débiles, pero al igual que la potencia de cálculo ha aumentado geométricamente, también lo ha hecho la potencia de los láseres. Ahora parece claro que una CET avanzada podría comunicar su presencia utilizando pulsos láser y podría preferir este método por radio. No sólo se destacaría un pulso corto de luz láser incluso en distancias interestelares, sino que sería claramente artificial. Además, una CET podría enviar señales de baliza a millones de estrellas cada día. Tal vez no deberíamos estar escuchando sólo las señales de radio; también deberíamos estar buscando señales en el espectro visible.[119]

FIGURA 36 El Very Large Array *(Conjunto Muy Grande) en Socorro, Nuevo México. El conjunto consta de 27 platos, cada uno de los cuales tiene 25 m de diámetro. A pesar de su aparición en la película* Contact*, el telescopio rara vez escucha las transmisiones de extraterrestres. Recientemente, sin embargo, trató de reubicar la señal* ¡Wow!.

El SETI óptico no es tan avanzado como el SETI tradicional de radio, pero esto está cambiando gracias principalmente a los esfuerzos de Stuart Kingsley. Kingsley utiliza su Observatorio COSETI (*Columbus Optical SETI*) para buscar señales láser de banda estrecha de una lista de estrellas objetivo. Es alentador que el equipo requerido para tal búsqueda sea relativamente simple y esté dentro del alcance del astrónomo aficionado dedicado.[120] Sin embargo, los científicos profesionales del SETI se han dado cuenta y están comenzando a desarrollar proyectos a gran escala.[121]

Incluso los rayos gamma han sido sugeridos como un canal de comunicación para las civilizaciones en contacto sobre distancias intergalácticas. John Ball plantea la hipótesis de que los estallidos de rayos gamma son mensajes enviados por CETs. Sin embargo, aunque el origen detallado de estos eventos todavía está siendo debatido, casi todos los astrónomos creen que los estallidos son un fenómeno natural. Tenemos que emplear la navaja de Occam una vez más: si podemos explicar los estallidos como un fenómeno natural, entonces la hipótesis de Ball es simplemente

innecesaria.

* * *

En 40 años de búsqueda — principalmente en la radio, pero ocasionalmente en el infrarrojo y cada vez más en lo visible — los astrónomos no han detectado ninguna señal. Para reformular la pregunta de Fermi: ¿dónde están las señales? La falta de señales significa que ahora podemos empezar a poner límites al número y tipo de CETs en nuestro vecindario. Algunos autores afirman que este resultado nulo significa que podemos descartar la presencia de civilizaciones K2 y K3 no sólo en nuestra Galaxia, sino incluso más allá de nuestro Grupo Local de galaxias.[122] Esta afirmación está exagerada, ya que se basa en varias suposiciones que pueden no ser válidas. Sin embargo, desde un punto de vista conservador, probablemente podemos descartar la existencia de una civilización K3 en cualquier parte de nuestra Galaxia y de una civilización K2 en nuestra parte particular de la Galaxia: si estuvieran allí, seguramente habríamos escuchado de ellos. En pocos años, si el resultado nulo continúa, podremos descartar la existencia de civilizaciones K1 a 100 años luz.

Miles de millones de canales y — hasta ahora — nada.

SOLUCIÓN 18: NUESTRA ESTRATEGIA DE BÚSQUEDA ES ERRÓNEA

Lo buscamos aquí, lo buscamos allá.

Baronesa Orczy,
La Pimpinela Escarlata

Incluso si las CETs están transmitiendo señales de radio, y estamos sintonizados en los canales correctos, ¿hacia dónde debemos apuntar nuestros telescopios? El cielo es grande, y nuestros recursos son pocos. Sería trágico entrenar nuestros telescopios en Canopus, digamos, si la civilización de Capella tratara de llamar nuestra atención.

Podemos emplear dos estrategias de búsqueda. Una búsqueda dirigida se centra en las estrellas individuales cercanas. Utiliza instrumentos de gran sensibilidad con la esperanza de detectar señales deliberadamente transmitidas hacia nosotros o radiación de fuga que pasa a nuestro paso. Un estudio de cielo ancho explora grandes áreas de la esfera celeste y por lo tanto abarca una miríada de estrellas. La sensibilidad de un estudiode cielo abierto es muy inferior a la de una búsqueda específica.

La primera búsqueda de una CET —Proyecto Ozma de Drake— tuvo como objetivo sólo dos estrellas: Tau Ceti y Epsilon Eridani. De las búsquedas modernas dirigidas, la más conocida es el Proyecto Phoenix: apunta a una lista de cerca de mil antiguas estrellas similares al Sol dentro de una distancia de 200 años luz, y escucha señales dentro del rango de 1,2 a 3,0 GHz en canales de sólo 0,7 Hz de ancho — así que para cada estrella se verifican más de 2.500 millones de canales. Sin embargo, la mayoría de los grandes proyectos del SETI actualmente en operación — tales como SERENDIP, SERENDIP del Sur y BETA — son estudios de cielo abierto. Los proyectos futuros — tales como el plan de la Liga SETI para vincular las observaciones de 5.000 radiotelescopios pequeños — serán estudios de cielo abierto.[123] Las búsquedas específicas son una rareza; de las búsquedas de radio más importantes de hoy en día, sólo el Proyecto Phoenix emplea una estrategia específica. ¿Quizás estemos empleando nuestros preciosos recursos del SETI de la manera equivocada? ¿Quizás no veamos CETs porque no estamos buscando con suficiente sensibilidad? ¿No deberíamos mirar duro, largo y profundo a los sistemas planetarios que podrían albergar vida, en lugar de mirar a través del cielo?

Bueno, no. Resulta que los estudios modernos de cielo abierto están haciendo lo correcto. Un análisis de Nathan Cohen y Robert Hohlfeld muestra que deberíamos jugar con los números y mirar tantas estrellas como sea posible.[124]

En la naturaleza, a menudo encontramos que los objetos con un gran valor de alguna propiedad son raros, mientras que los objetos con un valor más

pequeño de esa propiedad son comunes. Por lo tanto, las estrellas brillantes de clase espectral O son pocas en número, mientras que las estrellas tenues de clase M están muy extendidas. Las fuentes de radio fuertes como los cuásares son raras, mientras que las fuentes de radio débiles como las coronas estelares son comunes. ¿Qué es más probable que detectemos: los raros objetos "brillantes" o los objetos "oscuros" comunes? Depende de la fuerza de las fuentes raras en comparación con las fuentes comunes. Por ejemplo, los cuásares son emisores de radio increíblemente fuertes; no importa que estén a distancias extremas — superan con creces a las fuentes estelares más cercanas pero más débiles. Por lo tanto, los radiotelescopios a principios de la década de 1960 podían detectar cuásares distantes raros más fácilmente que las fuentes cercanas comunes. De la misma manera, incluso si las CETs avanzadas son increíblemente raros, Cohen y Hohlfeld demostraron que es más probable que detectemos sus balizas que las señales débiles de una multitud de CETs no mucho más avanzadas que nosotros mismos. (La única manera de evitar esta conclusión es si las estrellas están repletas de vida inteligente. Si las CETs son comunes, entonces una búsqueda dirigida como el Proyecto Phoenix es probable que encuentre uno en su lista de estrellas objetivo. Por lo tanto, es más probable que los estudios de cielo abierto produzcan resultados positivos; como mínimo, cuando elegimos objetivos para un estudio en profundidad, deberíamos intentar asegurarnos de que el haz receptor contiene galaxias o grandes cúmulos de estrellas detrás del objetivo.

Una frecuencia para la comunicación intergaláctica

Una frecuencia "natural" para la comunicación intergaláctica está representada por $f = k/h\ T_{\mathrm{O}} \approx 56{,}8\mathrm{GHz}$, donde T_{O} es la temperatura observada de la radiación cósmica de fondo, k es la constante de Boltzmann, y h es la constante de Planck (enlaza así los regímenes de la cosmología y la física cuántica). Esta frecuencia fue propuesta originalmente en 1973 por Drake y Sagan, e independientemente por Gott en 1982.

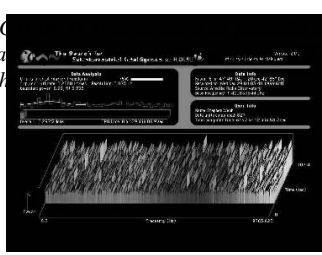
Tengo una pequeña sensación de malestar con los estudios de cielo abierto, y esto me recuerda al problema de la frecuencia con la que debemos escuchar. Los estudios abarcan galaxias distantes, y la mayoría de los estudios escuchan en o alrededor de la charca. Pero hay una mejor frecuencia que el pozo de agua para la comunicación intergaláctica (a diferencia de la interestelar): 56,8 GHz. Esta frecuencia está ligada al fondo cósmico de microondas observado, por lo que es una frecuencia universal. Si una CET en una galaxia distante de alto corrimiento emitiera una señal en una frecuencia relacionada con la anterior, entonces podría estar seguro de que la señal podría ser recibida en cualquier momento futuro. La señal podría potencialmente alcanzar un gran número de galaxias.[125] (Hay otro factor a considerar aquí. En la Tierra se necesitaron unos 4.500 millones de años para que surgiera una civilización

tecnológica. Si este es el tiempo que les toma a otras civilizaciones surgir, entonces — dependiendo de los detalles exactos del modelo cosmológico que uno prefiera — es inútil mirar galaxias con corrimientos al rojo mucho más grandes que 1. La luz que ahora vemos desde estas galaxias distantes partió cuando el Universo tenía sólo unos 4.5 mil millones de años de edad; no habría habido tiempo para que surgiera una civilización K3). Desafortunadamente, la atmósfera de la Tierra tiene una amplia banda de absorción de oxígeno a 60 GHz, lo que significa que nuestros radiotelescopios no pueden realizar una búsqueda a 56,8 GHz. Las observaciones a esta frecuencia deberán realizarse desde el espacio. Mientras tanto, quizás una civilización K3 en una galaxia lejana nos está señalando ahora mismo.

* * *

No puedo abandonar este debate sin mencionar uno de los proyectos científicos más innovadores de los últimos tiempos. Desde que Drake apuntó por primera vez su radiotelescopio a Tau Ceti con la esperanza de encontrar una señal, los ingenieros han mejorado la sensibilidad de los receptores de radio por un factor de alrededor de 20, y los astrónomos han acumulado mucho más conocimiento sobre el nacimiento y la evolución de los sistemas estelares. Pero el mayor desarrollo desde los días del Proyecto Ozma ha sido el notable aumento de la potencia de cálculo disponible. El proyecto SETI@home, fundado por David Gedye, ha aprovechado este poder de una manera que ha capturado el entusiasmo del público en general como quizás ningún otro proyecto científico lo ha hecho.[126] Los participantes descargan un pequeño programa cliente para su computadora en casa o en el trabajo.

FIG
bla
@h



El programa usualmente funciona como un salvapantallas; en esencia, cuando la computadora del usuario no está ocupada en un trabajo "apropiado", el programa cliente cobra vida y comienza los cálculos en un paquete de datos — conocido como unidad de trabajo — tomado por el radiotelescopio de Arecibo. Una vez finalizados los cálculos, el programa envía la unidad de trabajo de vuelta a SETI@home, donde se fusiona con todos los demás resultados de todo el mundo, y se descarga una nueva unidad de trabajo. Más de un millón de CPUs han obtenido datos de Arecibo, y se han combinado para hacer de SETI@home la computadora virtual más grande y poderosa del mundo.[127] Esta inmensa potencia de computación ha permitido a los astrónomos hacer una de las búsquedas más finamente sintonizadas de

CETs jamás intentadas: el programa mira los datos de una banda con un ancho de 2,5 MHz centrada en la línea de hidrógeno de 1.420 MHz, y examina canales tan estrechos como 0,07 Hz.

* * *

Nuevos proyectos como SETI@home — y proyectos tradicionales como SERENDIP y BETA — parecen haber acertado en la estrategia de búsqueda: mirar amplias áreas del cielo, a través de miles de millones de estrellas, y esperar que en algún lugar de esa vasta colección encontremos una transmisión muy rara pero muy poderosa.

Hasta ahora, no hemos oído nada.

SOLUCIÓN 19: LA SEÑAL YA ESTÁ PRESENTE EN LOS DATOS

No busco; encuentro.
Pablo Picasso

Cuarenta años de proyectos SETI han acumulado una enorme cantidad de datos. ¿Es posible que en algún lugar de todos esos datos haya una huella digital de una CET, una señal que aún no hemos reconocido?

Los detectores SETI pueden ser engañados por una gran cantidad de señales terrestres: radiación dispersa de teléfonos móviles, radar de dispositivos militares, etc. Los astrónomos del SETI están alertas a estas fuentes de interferencia y usualmente pueden identificarlas por lo que son. Pero aún quedan algunas excepciones tentadoras. Por ejemplo, el proyecto META registró varias señales que eran transmisiones no aleatorias y posiblemente inteligentes.[128] Zuckerman y Palmer examinaron 700 estrellas cercanas y registraron diez señales que podrían haber sido artificiales.[129] Ya hemos discutido la famosa señal "¡Wow!

El problema es que cuando los astrónomos redirigen sus telescopios en la dirección de donde vino la señal, no encuentran nada. Las señales nunca se repiten. Tal vez estas señales eran en realidad emisiones intermitentes de CETs, un rayo de luz que barrió la Tierra antes de alejarse. O quizás eran simplemente una fuente de interferencias de radio que aún no se ha identificado.

Otro problema surge con la interpretación de los datos de los telescopios. Recogemos fotones de los estallidos de rayos gamma y explicamos su origen en términos de una bola de fuego cataclísmica; recogemos fotones de estrellas con un exceso de infrarrojos y deducimos que la estrella está envuelta en polvo; encontramos un espectro térmico e inferimos que proviene de un cuerpo negro. Podríamos explicar todas estas observaciones en términos de actividad de la CET. Como hemos visto, Ball sugirió que las CETs podrían comunicarse intercambiando ráfagas de rayos gamma; una de las firmas de una esfera Dyson es un exceso de infrarrojos; el modo más eficiente de comunicación (que una CET presumiblemente emplearía) es indistinguible de la radiación de cuerpo negro para observadores como nosotros, que no están al tanto del sistema utilizado.

En última instancia, la dificultad es que estamos atrapados en una pequeña roca, en el fondo de una atmósfera espesa, tratando de dar sentido al Universo interpretando los fotones ocasionales que nuestros telescopios pueden captar. Esto es un desafío. A veces los científicos pueden estar equivocados; pero si podemos explicar las observaciones en términos de fenómenos naturales, entonces no necesitamos postular la existencia de las CET. Occam, otra vez. Así que cuando observamos, por ejemplo, que los espectros de casi todas las galaxias muestran un corrimiento hacia el rojo, es suficiente explicarlo en

términos de la expansión del Universo — una explicación fantástica (y hermosa) en sí misma. No necesitamos suponer, como lo hizo una historia del SF, que los corrimientos al rojo son los gases de escape de las naves alienígenas que huyen de la humanidad.

Tenemos que esperar que las CETs avanzadas hagan que sus señales sean inequívocas y claramente distinguibles del ruido. Esperemos que sus señales sean fuertes; si nuestra actual generación de detectores no es lo suficientemente sensible para la tarea, entonces se habrán desperdiciado 40 años de observación. Y tenemos que esperar que repitan sus señales a menudo. Sería una lástima si ya hemos grabado una señal pero no podemos probar que es de una CET.

SOLUCIÓN 20: NO HEMOS ESCUCHADO LO SUFICIENTE

La paciencia es amarga, pero su fruto es dulce.

Jean-Jacques Rousseau,
Emile

En 1991, Drake escribió sobre sus esperanzas de detectar señales de una CET: "Este descubrimiento, del que espero ser testigo antes del año 2000, cambiará profundamente el mundo".[130] Diez años después, mucho ha sucedido en la investigación del SETI. El campo está prosperando. Pero el descubrimiento no se ha hecho. Tal vez Drake simplemente estaba siendo impaciente. Quizás la respuesta a la paradoja de Fermi es que las CETs están ahí fuera, comunicándose entre sí e incluso intentando comunicarse con nosotros, pero que simplemente no hemos escuchado lo suficiente para que nuestra búsqueda dé fruto.

Esta es la posición que toman los entusiastas del SETI, y por una buena razón. Considere, por ejemplo, algunas de las dificultades que tiene el telescopio Arecibo para recibir una señal de una CET. Una es que el área de recepción del rayo de Arecibo cubre sólo un pequeño trozo de cielo en un momento dado, por lo que hay millones de direcciones ligeramente diferentes en las que los astrónomos pueden apuntar el telescopio. Otra es que por cada trozo de cielo hay miles de millones de frecuencias que comprobar. Otra dificultad es que una señal puede tomar la forma de una ráfaga en lugar de un faro continuo; para detectar una ráfaga, Arecibo tiene que estar apuntando hacia allí en el momento adecuado. En resumen, para detectar una señal de radio de una CET, nuestros telescopios deben estar apuntando en la dirección correcta en el momento correcto y sintonizados a la frecuencia correcta. Hay billones de combinaciones posibles de estos parámetros, de los cuales sólo hemos comprobado una fracción. Si las CETs decidieran charlar entre ellos usando *láseres*, entonces es extremadamente improbable que la Tierra estuviera en el camino de cualquiera de los rayos; miles de millones de civilizaciones podrían estar ahí fuera, hablando entre sí, y no las escucharíamos. Por lo tanto, no parece irrazonable decir que no hemos buscado lo suficiente. Quizás simplemente tenemos que ser pacientes.[131]

Algunas personas, sin embargo, creen que esta es una resolución insatisfactoria de la paradoja de Fermi. En cierto sentido, el quid de la paradoja es que hemos estado "esperando" pruebas de extraterrestres durante miles de millones de años: ellos mismos, o sus sondas, o al menos sus señales, *ya deberían estar aquí*. La evidencia de su existencia, cualquiera que sea la forma que dicha evidencia pudiera tomar, debería haber estado aquí mucho antes de que la humanidad comenzara a preguntarse si había otras especies en el mundo. Pasar unas cuantas décadas más observando, con una tecnología mucho más poderosa, no tiene sentido.

Considerémoslo de otra manera. ¿Cuántas CETs habitan actualmente en la galaxia? Sagan y Drake sugirieron que podría haber 10^6 CETs en nuestra Galaxia en, o más allá de, nuestro nivel actual de desarrollo tecnológico (así que en promedio debería haber una CET dentro de los 300 años luz de la Tierra).[132] Una estimación más conservadora de Horowitz es que podría haber 10^3 CETs avanzadas en nuestra Galaxia (así que, si se distribuyen aleatoriamente a través del espacio, habrá una CET dentro de los 1.000 años luz de la Tierra). Si estas civilizaciones de 10^3 a 10^6 años son longevas —quizás de miles de millones de años— entonces seguramente deben tener un nivel de tecnología Clarke (una que, para nosotros, es indistinguible de la magia). Incluso si no quieren viajar, o les resulta imposible viajar, seguramente tales civilizaciones podrían hacernos fácil verlas; ¿por qué no lo hacen? Alternativamente, estas civilizaciones pudieron ser efímeras. (Muchos autores a menudo establecen parámetros en la ecuación de Drake de tal manera que llegan a la relación $N = L$. En otras palabras, el número de civilizaciones por ahí en este momento es igual a su promedio de vida. Si hay 1000 civilizaciones ahora, y si la tasa de formación de civilizaciones tecnológicas ha sido más o menos constante a lo largo de la historia de la Galaxia, entonces cerca de 10 mil millones de civilizaciones habrán vivido y muerto en nuestra Galaxia solamente. ¿Es probable que ninguna CET haya dejado constancia de sus esperanzas, sus logros, su existencia? (Si es verdad, es un pensamiento casi insoportablemente triste.)

Volvemos a la pregunta: ¿dónde están, en su nave, en sus sondas o en sus señales? No deberíamos tener que esperar a recibir pruebas de su existencia; las pruebas ya deberían estar aquí.

SOLUCIÓN 21: TODOS ESTÁN ESCUCHANDO, NINGUNO ESTÁ TRANSMITIENDO

Nunca la menor conmoción hizo a los oyentes.

Walter de la Mare,
Los oyentes

Hemos debatido brevemente las dificultades para intentar recibir una señal de las CETs. No hemos considerado lo difícil que puede ser para ellos enviar una señal. Una cosa parece segura: no importa lo difícil que sea detectar una señal de un sistema planetario no especificado entre los cientos de miles de millones de estrellas de la galaxia, debe ser mucho más difícil enviarla — al menos, enviarla con la expectativa de que sea detectada. ¿Podría ser que todo el mundo está escuchando y nadie está transmitiendo?

En cierto modo, nuestra civilización ya transmite señales al cielo. Durante varias décadas, nuestros transmisores de radio y televisión han estado filtrando radiación EM al espacio. Mientras escribo, las transmisiones en vivo sobre la caída del Muro de Berlín podrían estar barriendo a la estrella Tau Ceti; las noticias del asesinato de Kennedy ahora podrían estar llegando a Arcturus; los amantes del cricket en el sistema Castor pronto podrían recibir noticias de las últimas entradas de prueba de Bradman. Pero es discutible si estas transmisiones serán detectadas, incluso si las CETs están escuchando. Nuestros transmisores dirigen sus haces horizontalmente, para ser recogidos por antenas individuales. Así que aunque parte de la salida se pierde en el espacio — un rayo de radiación EM barre el espacio mientras la Tierra gira sobre su eje y orbita el Sol — es cuestión de suerte si alguno de ellos se cruza con una estrella distante. Además, el alto ancho de banda y la relativamente baja potencia de nuestros transmisores significan que incluso un telescopio tipo Arecibo lucharía por detectar nuestras emisiones mucho más allá de la órbita de Plutón. Por lo tanto, a menos que las CETs estén cerca, sean extremadamente afortunados y tengan un nivel de tecnología de recepción muy superior al nuestro, es poco probable que detecten nuestras transmisiones inadvertidas.[133] Además, la cantidad de esta radiación de fuga está disminuyendo a medida que aumentamos nuestro uso del cable. (La radiación de radares militares poderosos, y las señales que los astrónomos rebotan en Venus y Marte para cartografiar la topografía de esos planetas, tienen más posibilidades de ser detectadas en distancias interestelares. Por otro lado, tal radiación está altamente enfocada; es improbable que el rayo se cruce con un receptor alienígena.

¿Y si *quisiéramos* ser notados? En lugar de confiar en la suerte y esperar que una CET anuncie nuestra televisión (esperando también, quizás, que reciban *Cheers* en lugar de *Los Ángeles de Charlie*), necesitaríamos un medio para transmitir una poderosa señal de banda estrecha. Esta es la otra cara de

SETI: en lugar de reflexionar sobre la mejor manera de escuchar, consideramos los aspectos prácticos de cómo *transmitir*. Por supuesto, al estudiar el problema de cómo transmitir una señal a través de distancias interestelares, podemos aprender mucho que nos ayudará a escuchar las señales.

Supongamos que decidimos usar la radio. El primer problema es qué frecuencia de transmisión utilizar. La lógica que nos hace *escuchar* las señales en la charca sugiere que deberíamos *transmitir* a algún lugar de esa región, aunque se podrían presentar argumentos a favor de varias otras frecuencias. Una vez que hayamos decidido la frecuencia —y supongamos por el momento que debemos emitir en la charca-, ¿qué tecnología se necesitaría?

Como no sabemos de antemano dónde puede residir una CET, la opción más segura es transmitir isotrópicamente — con la misma potencia en todas las direcciones. Si quisiéramos enviar una señal de banda estrecha para que pudiera ser detectada por una pequeña antena a una distancia de 100 años luz, digamos, entonces la potencia requerida por el transmisor excedería la actual capacidad total instalada de generación de electricidad en el mundo. Y 100 años luz apenas se extiende más allá de nuestro vecindario inmediato. Cuanto más lejos queramos que se reciba la señal, mayor será el requerimiento de energía del transmisor. Por lo tanto, un transmisor isotrópico está muy por encima de nuestra capacidad tecnológica actual. Incluso si *pudiéramos* construir tal dispositivo, ¿daríamos un nivel tan grande de recursos a un proyecto que no tiene ninguna garantía de éxito?

Si las CETs escuchan con un telescopio tipo Arecibo en lugar de un simple plato, entonces los requerimientos de energía para el transmisor disminuyen. De hecho, si supiéramos la ubicación exacta de un telescopio tipo Arecibo al otro lado de la galaxia, entonces nuestro propio Arecibo podría enviarle una señal. El problema es que no sabemos de antemano hacia dónde apuntar el transmisor. Una antena parabólica tipo Arecibo, que opera a una frecuencia en la región del pozo de agua, tiene un haz extremadamente estrecho. El viejo dictado de la aguja y el pajar no empieza a transmitir la improbabilidad de enviar un rayo estrecho que simplemente se alinea con un receptor grande en algún lugar de las profundidades del espacio.

La transmisión isotrópica, que garantiza que cualquier persona con un oído pueda oírle, es extremadamente costosa; la transmisión por haces, que es barata, excluye a la mayoría de su audiencia potencial. Estos son los dos extremos de una estrategia de transmisión. Podríamos hacer varias concesiones y compromisos, y las CETs podrían dedicar más recursos a la transmisión que la humanidad en la actualidad. Pero la transmisión interestelar por radio no es fácil.

A la luz de estas dificultades — y hay varias otras que no he descrito — quizás las CETs decidan dejar que otros hagan el duro trabajo de la transmisión. ¿Quizás la galaxia está llena de civilizaciones esperando una llamada?

Esta es una resolución improbable de la paradoja. Las dificultades pueden parecernos insuperables, pero seguramente presentarían menos desafíos para, digamos, una civilización K3. Y muchos de los problemas que rodean la transmisión son superables incluso con nuestro nivel *actual* de tecnología — ¡si nos alejamos de la idea de usar ondas de radio!

Incluso con nuestra tecnología láser actual podemos generar un pulso de luz que, durante un corto periodo de tiempo, eclipsa al Sol. Una CET avanzada presumiblemente no tendría problemas en generar un pulso que es, brevemente, miles de millones de veces más brillante que su estrella. Tales pulsos pueden ser detectados con un telescopio óptico relativamente pequeño conectado a un dispositivo de acoplamiento de carga. Además, a distancias de unos pocos miles de años luz, el medio interestelar tiene relativamente poco efecto en una señal de luz visible; a diferencia de la radio, la comunicación óptica no se corrompe. Los láseres son en muchos sentidos un mecanismo de transmisión más efectivo que las antenas de radio.

El inconveniente de la comunicación óptica es que el haz es *extremadamente* estrecho. Por lo tanto, la civilización transmisora debe conocer la ubicación exacta del telescopio receptor. Es el mismo problema que enfrentan los transmisores de radio si generan señales de haz estrecho, excepto que es mucho peor. Es inútil enviar una señal láser al azar; es poco probable que el rayo sea detectado. Por lo tanto, la civilización transmisora debe elaborar una lista de sistemas planetarios objetivo junto con valores precisos y exactos para las posiciones de esos sistemas. Además, las estrellas no están en reposo. Si una CET envía una señal a donde está *ahora* la estrella, entonces para cuando la luz llegue a ella la estrella se habrá movido. Así que la civilización transmisora también necesita información precisa sobre las velocidades de las estrellas objetivo.

Reunir información sobre otros sistemas planetarios y la ubicación y velocidad precisas de las estrellas no es fácil; pero tampoco es imposible para una civilización avanzada más allá de la nuestra. La reciente misión de Hipparcos obtuvo tales datos sobre las estrellas más cercanas, y propuso proyectos como la misión *Darwin* de ESA y el *Buscador de Planetas Terrestres* de la NASA detectarán cualquier planeta del tamaño de la Tierra alrededor de las 200 estrellas más cercanas.[134] Si podemos contemplar tales misiones, entonces una civilización un poco más avanzada que la nuestra debería ser capaz de usar comunicación óptica sobre distancias interestelares — y señales de radio también, si así lo desean. Por lo tanto, no parece haber ninguna razón técnica por la que las CETs no puedan transmitir.

* * *

Vale la pena mencionar que la humanidad ya ha transmitido dos señales a las estrellas (deliberadamente, es decir, a diferencia de las fugas de las estaciones de radiodifusión). La primera señal intencional fue enviada en 1974.[135] Su autor fue Drake, quien aprovechó la ceremonia inaugural del

restaurado telescopio de Arecibo para enviar un mensaje a 2,38 GHz en dirección a M13. (Este es un cúmulo globular que contiene alrededor de 300.000 estrellas, pero desafortunadamente no del tipo que esperamos posean planetas similares a la Tierra. El mensaje duró 3 minutos y era solamente 1679 bits de largo, pero Drake logró empaquetar mucha información. Cuando la señal llegue a M13 en unos 24.000 años, si los astrónomos pudieran decodificarla, podrían aprender una cantidad sorprendente sobre nosotros. Aunque no pudieran decodificarlo, la propia detección de la señal transmitiría información; les diría que una especie inteligente estaba aquí y que había avanzado a la etapa de radio — el hecho mismo de la señal lleva un mensaje. (La segunda transmisión, en 1999, fue un mensaje de 400.000 bits a 5 GHz a cuatro estrellas cercanas similares al Sol. El mensaje fue enviado varias veces; desafortunadamente, la primera transmisión contenía un error tipográfico)[136].

También vale la pena mencionar que Drake fue criticado porque hizo su transmisión sin consultar ampliamente. La transmisión representaba a la Tierra, pero a ningún gobierno nacional se le pidió su opinión sobre el contenido de la señal. En la práctica, las transmisiones aisladas como ésta no tienen esencialmente ninguna posibilidad de ser detectadas; pero quizás las futuras transmisiones a gran escala desde la Tierra requerirán un gobierno planetario que pueda hablar por todos nosotros. Tal vez una CET avanzada, reconociendo los problemas éticos de la transmisión de señales al Universo, sólo transmite cuando ha alcanzado un nivel de unidad tal que sus señales representan un consenso de todo su mundo. Y quizás por eso todavía estamos esperando saber de ellos: no escuchan por dificultades técnicas sino por dificultades éticas.[137]

Esta es otra resolución improbable a la paradoja. Atribuir motivos a supuestas civilizaciones alienígenas es probablemente inútil. Y una vez más tenemos que preguntarnos si una preocupación por las sutilezas éticas de la transmisión afectaría a todas las civilizaciones. Todo lo que podemos decir con certeza es que enviar un mensaje al Universo, con la expectativa de que será recibido por otra civilización, es difícil. Pero no es imposible. Algunas civilizaciones deberían estar ahí fuera, señalando su presencia. Entonces, ¿por qué no hemos sabido nada de ellos?

SOLUCIÓN 22: BERSERKERS

A la larga, todos estamos muertos.
J. M. Keynes

Durante los años 50, los estrategas de la Guerra Fría jugaron con la idea de un arma del Juicio Final. Tal arma era terrible, incontrolable, capaz de destruir toda la vida humana en la Tierra — incluyendo a los dueños del arma. Si tu enemigo supiera que estás dispuesto a desplegar un dispositivo del Día del Juicio Final, no se atreverían a atacarte. Sospecho que Fred Saberhagen tenía en mente el arma del Día del Juicio Final cuando escribió sus famosas historias de berserkers.[138]

Los berserkers son máquinas sensibles y auto-reproductoras que son salvajemente hostiles a la vida orgánica. Piensa en ellos como sondas paranoicas de Bracewell-von Neumann con una mala racha. La relevancia de la paradoja de Fermi es clara: o bien se ha impedido que las CETs surjan de los berserkers, o han sido eliminados por los berserkers, o bien se mantienen en silencio por miedo a atraer a los berserkers. Es una solución elegante a la paradoja de Fermi. ¿Pero podrían existir berserkers fuera de las páginas de la ciencia ficción?

Si una CET pudiera construir sondas capaces de colonizar la Galaxia, entonces desafortunadamente la construcción del berserker presumiblemente no estaría más allá de ellos técnicamente. Es difícil imaginar una especie inteligente que *realmente* quiera desarrollar berserkers, ya que la tecnología es tan peligrosa para los creadores como para cualquier otra vida. Además, ¿cuál sería su motivación para construir berserkers? Si su objetivo era colonizar la galaxia por sí misma, entonces podría cumplir su objetivo simplemente siendo el primero en colonizar: recuerde que el tiempo de colonización de la galaxia es mucho menor que la edad de la galaxia. Sin embargo, no debemos ser demasiado optimistas sobre la perspectiva de los berserkers. Supongamos que la programación de una sonda "bien ajustada" muta; tal vez una colisión con un rayo cósmico extraviado cambie la línea de código en su módulo central de "buscar nueva vida y nuevas civilizaciones" a "buscar nueva vida y nuevas civilizaciones, y *matarlas*". Las sondas auto-reproductoras evolucionarán inevitablemente, por lo que podrían desarrollarse dispositivos de tipo berserker.

* * *

La solución berserker ha sido criticada por varios motivos. Incluso si los berserkers existen, ¿serían una Némesis inevitable? ¿No podrían las CETs "inocularse" a sí mismos, de la misma manera que se inocularían a sí mismos contra una enfermedad virulenta? Lo más revelador es que el escenario

berserker sufre de una paradoja Fermi propia: si los berserkers existen, ¿por qué *estamos* aquí? Los locos ya deberían haber esterilizado nuestro planeta. En cambio, como veremos en secciones posteriores, el registro geológico indica que la vida ha estado presente en la Tierra durante miles de millones de años. Sin duda, la Tierra ha visto varias extinciones masivas, pero hay explicaciones naturales para estos eventos. (El Universo ya es bastante peligroso sin berserkers.) Entonces, ¿por qué los berserkers han silenciado a todas las demás civilizaciones pero nos han dejado en paz? Podríamos argumentar que los berserkers destruyen sólo formas de vida tecnológicas y necesitan un "disparador" — presumiblemente la detección de ondas de radio — antes de comenzar a trabajar. Pero ese paso extra en el argumento echa a perder lo que es potencialmente una elegante resolución de la paradoja de Fermi. Además, hemos estado usando la radio durante un siglo y es posible que pronto se vuelva silenciosa a pesar de nuestro floreciente nivel de tecnología. Si los locos son todo lo que están locos, ¿dónde están?

SOLUCIÓN 23: NO TIENEN NINGÚN DESEO DE COMUNICARSE

La palabra es grande, pero el silencio es mayor.
Thomas Carlyle,
Ensayos: Características de Shakespeare

Hasta ahora hemos asumido que las CETs quieren comunicarse. ¿Quizás no?

Las resoluciones de la paradoja basadas en la idea de que las CETs se guardarán para sí mismos dependen de hacer suposiciones sobre los motivos de los seres extraterrestres. Si tales seres existen, serán el producto de miles de millones de años de evolución en ambientes sobrenaturales, con sentidos, impulsos y emociones diferentes a los nuestros. O pueden ser inteligencias artificiales que han tomado el relevo de sus creadores biológicos. O pueden ser de una forma más allá de nuestra imaginación. En cualquier caso, ¿cómo podemos pretender entender los motivos de inteligencias tan vastamente diferentes de las nuestras? Probablemente no podemos entender los motivos extraterrestres — pero es divertido especular.

* * *

Una de las razones por las que las CETs pueden optar por permanecer callados es el miedo. Cuando una CET transmite al espacio, revela su ubicación y quizás su nivel de tecnología. Cualquier vecino que esté escuchando puede ser agresivo; peor aún, pueden ser berserkers. No tenemos idea de si los extraterrestres pensarían de esta manera, pero muchos humanos ciertamente lo hacen. Tal vez la precaución es un rasgo general entre las inteligencias avanzadas.[139]

Otros han sugerido que el espíritu de curiosidad que impregna a la humanidad (y a muchas otras especies terrestres) podría faltar en los extraterrestres inteligentes. Quizás las CETs simplemente no tienen interés en explorar el Universo o en comunicarse con otras civilizaciones. Se podría argumentar que las CETs que carecen de curiosidad y deseo de aprender cómo funciona el Universo nunca desarrollarían la tecnología para comunicarse a través de distancias interestelares; que cualquier especie inteligente que encontremos debe tener curiosidad por el mundo exterior. Pero un vistazo a los libros de historia muestra que ha habido culturas humanas que eran aislacionistas, que no querían tener nada que ver con otras. Quizás una filosofía similar es común entre las CETs.

Un argumento más común, generalmente presentado con un espíritu de humildad, es que cualquier CET estaría tan lejos de nosotros intelectualmente que sería indiferente a nuestra existencia. Escuché a un astrónomo decir que las civilizaciones avanzadas “no querrían comunicarse con nosotros porque no

podríamos enseñarles nada; después de todo, no queremos comunicarnos con insectos". Pero, ¿es eso cierto? Es poco probable que seamos capaces de enseñar a una CET avanzada algo acerca de una ciencia "dura" como la física, por ejemplo. Pero en realidad, la física es fácil: el Universo está construido de un pequeño número de bloques de construcción que interactúan en un pequeño número de formas bien definidas. El Universo es inteligible.

Por lo tanto, es poco probable que las CETs avanzadas pasen mucho tiempo discutiendo la física; todos tendrán las mismas teorías de la física porque todos ellos habitan el mismo Universo. Las áreas de estudio que son *realmente* difíciles — en el sentido de difíciles de dominar — son temas como la ética, la religión y el arte. Las CETs avanzadas no querrían aprender acerca del electromagnetismo de nosotros, pero podrían estar fascinados en tratar de comprender y entender cómo vemos el Universo — un desafío digno de ellos. Además, no es correcto decir que "no queremos comunicarnos con insectos". Los biólogos han hecho todo lo posible por interpretar las señales que podrían estar codificadas en el baile de la abeja melífera; la comunicación de las feromonas por parte de las hormigas ha sido estudiada durante mucho tiempo. Tales investigaciones son parte de un estudio más amplio de la comunicación y cognición animal. De hecho, la posibilidad de comunicarse con especies "inferiores" ha fascinado a los humanos durante miles de años. El hecho de que podamos ser una especie "inferior" en comparación con otras no significa que seamos intrínsecamente poco interesantes. (Además, incluso si las CETs *son* indiferentes a las formas inferiores como nosotros, esto no explica por qué no hemos visto o escuchado sus comunicaciones con sus compañeros.

No todas las culturas son expansionistas

El ejemplo más citado de una civilización aislacionista es el de China bajo la dinastía Ming.

La dinastía fue fundada en 1368 por Zhu Yuanzhang, que se convirtió en el emperador de Hongwu (que en traducción significa Extremadamente Marcial).[140] Bajo su gobierno, y más tarde el del emperador de Yongle, China expandió su imperio. El emperador de Yongle y su sucesor, el emperador de Xuande, enviaron al gran almirante y explorador Zheng He en siete viajes notables. Los viajes lo llevaron hasta la India, el Golfo Pérsico y la costa de África Oriental. Zheng He comandó una de las más grandes armadas de la historia — en su primer viaje, 60 de los 317 barcos eran "Barcos del Tesoro" de 400 pies de eslora; debe haber sido una vista impresionante — e indudablemente China era la principal potencia marítima de la época. De hecho, China era probablemente la nación tecnológicamente más avanzada de la Tierra. Pero después de la muerte de Zheng He y del emperador Xuande, y por razones que aún se debaten, China dejó sus políticas expansionistas, prohibió el comercio exterior y se embarcó en un camino hacia adentro.

Otro argumento común es que las CETs superinteligentes se abstienen de comunicarse con nosotros para protegernos de un complejo de inferioridad; están esperando hasta que podamos aportar contribuciones valiosas a las conversaciones que tienen lugar en el Club Galáctico. (Presumiblemente, por lo tanto, las CETs deliberadamente "hablan por encima de nuestras cabezas"; también pueden colocarnos bajo interdicción, como lo discutimos anteriormente).[141] De niños aprendemos de nuestros hermanos mayores, padres y maestros; de adultos aprendemos de los grandes autores, científicos y filósofos del pasado. No es gran cosa: en el peor de los casos, cuando descubrimos que nunca escribiremos tan bien como Shakespeare o tenemos una visión tan profunda como la de Newton, podemos sentirnos decepcionados, pero luego nos encogemos de hombros y hacemos lo mejor que podemos. En el mejor de los casos, ver los logros de otros sirve para inspirarnos. ¿Por qué debería ser diferente para las sociedades?[142]

Es posible inventar muchas otras razones por las que los extraterrestres inteligentes son reservados. Tal vez alcancen la plenitud espiritual en su planeta natal y no vean la necesidad de buscar a otros. Tal vez creen que sólo las especies éticamente avanzadas deberían intentar propagarse al espacio y están esperando evolucionar hacia una especie así. Tal vez el inevitable retraso en la comunicación interestelar hace que la interacción con otras especies parezca menos atractiva; tendría que ser unidireccional. (Pero nos dedicamos a la comunicación unidireccional todo el tiempo. Leemos a Homero porque sus obras son *interesantes*, a pesar de que no tenemos ninguna oportunidad de entablar una comunicación bidireccional con él. Tal vez —y esto es un pensamiento deprimente, dada nuestra falta de progreso en los vuelos espaciales desde las misiones Apolo— no se les puede molestar.

* * *

El problema con todas estas resoluciones de la paradoja de Fermi es que requieren una improbable uniformidad de motivo. Si la galaxia es el hogar de un millón de civilizaciones, como sugieren los optimistas, entonces tal vez algunos de ellos no tienen ningún deseo de comunicarse con otros. Pero explicar la paradoja requiere que *todas* las civilizaciones se comporten de esa manera. Y seguramente eso es improbable.

De hecho, el problema podría ser aún más agudo de lo que sugiero más arriba. Para desarrollar la comunicación interestelar, una civilización requiere presumiblemente una comunidad de miles de millones de mentes. La humanidad, por ejemplo, ha recurrido a lo largo de los siglos al genio de un gran número de mentes para desarrollar nuestro nivel actual de tecnología. Si esto es cierto para otras CETs, entonces puede haber trillones de individuos inteligentes por ahí — algunos de los cuales, si pertenecen a una civilización K3, tendrán acceso a una tecnología inimaginablemente poderosa. En este caso, estas resoluciones de la paradoja de Fermi exigen una uniformidad de motivos no sólo *entre* las CET sino también entre miembros individuales o

grupos *dentro* de una CET.

SOLUCIÓN 24: DESARROLLAN UNA MATEMÁTICA DIFERENTE

Los enteros fueron creados por Dios; todo lo demás es obra del hombre.

Leopold Kronecker

Uno de los misterios permanentes de la ciencia es, como dijo Wigner, "la efectividad irrazonable de las matemáticas".[143] ¿Por qué las matemáticas describen tan bien a la Naturaleza? Cualquiera que sea la razón, debemos estar agradecidos de poder comprender el Universo matemáticamente. Podemos construir puentes que permanezcan en pie, construir aviones que permanezcan en el aire y diseñar computadoras que sean una maravilla de la miniaturización; en última instancia, toda la tecnología moderna depende de las matemáticas. (La gente ha construido puentes, aviones y computadoras por ensayo y error, pero yo no quisiera usarlos.

Tal vez la mayoría de los matemáticos, al menos tácitamente, se suscriben al platonismo. La filosofía platónica sostiene que las matemáticas y las leyes matemáticas existen en algún tipo de forma ideal fuera del ámbito del espacio y el tiempo. El trabajo de un matemático puro es por lo tanto similar al de un buscador de oro; un matemático busca pepitas de verdades matemáticas absolutas preexistentes. Las matemáticas se descubren, no se inventan.

Algunos matemáticos, sin embargo, argumentan fuertemente desde una postura antiplatónica. Afirman que las matemáticas no son una especie de esencia idealizada independiente de la conciencia humana, sino más bien la invención de las mentes humanas. Es un fenómeno social, parte de la cultura humana. (Esto es algo bastante valiente para que lo propongan los matemáticos profesionales, porque superficialmente la propuesta puede sonar como los desvaríos lunáticos de esos críticos posmodernistas que denuncian la ciencia como la construcción arbitraria de europeos blancos muertos). El antiplatonista sostiene que los objetos matemáticos son creados por nosotros, de acuerdo con las necesidades de la vida cotidiana. Puede ser, argumentan, que la evolución ha conectado un "módulo aritmético" en nuestros cerebros. Los neurocientíficos incluso tienen una posible ubicación para este módulo: la corteza parietal inferior, un área del cerebro hasta ahora poco comprendida.[144]

No me sorprendería que todos tuviéramos una unidad de procesamiento aritmético en nuestras cabezas. Después de todo, nuestros antepasados vivían en un mundo de objetos discretos en el que la capacidad de reconocer números de depredadores o números de presas habría sido extremadamente ventajosa. De hecho, puesto que la capacidad de hacer juicios rápidos basados en el número percibido de objetos es tan claramente útil, podríamos esperar que los animales posean algún tipo de "sentido numérico". Y, de hecho, hay evidencia de que ratas y mapaches, pollos y chimpancés pueden hacer juicios numéricos rudimentarios. (Sin embargo, es improbable que ningún otro

animal que no sean los humanos pueda *contar* en el sentido de que nosotros lo entendemos. En experimentos que pretenden demostrar la capacidad de contar en animales, es difícil descartar la posibilidad de que los animales estén utilizando procesos cognitivos mucho más simples. Por ejemplo, cuando se trata de un pequeño número de objetos, los animales pueden estar subitizando. Nosotros hacemos lo mismo: si nos presentan un plato con 3 galletas, *sabemos* que hay 3 galletas, no 2 o 4, sin tener que contarlas. Esto es subitización — un proceso perceptivo que funciona para un número de objetos de hasta 6. El proceso funciona bien para 3 objetos, por ejemplo, porque sólo hay un número limitado de maneras de organizarlos [variaciones en los patrones y… más o menos se agotan las posibilidades]. Hay tantas maneras de organizar 23 objetos, por ejemplo, que ninguna pista perceptual nos permite distinguir fácilmente un grupo de 23 objetos de 22 o 24 objetos. De manera similar, muchos animales pueden juzgar la cantidad relativa. Por ejemplo, preferirán una gran cantidad de alimentos a una cantidad más pequeña. Sin embargo, una vez más, los animales no necesitan contar — después de todo, un montón de 500 semillas de pájaro simplemente parece más grande que un montón de 300 semillas de pájaro. En tales experimentos es casi seguro que los animales están usando señales visuales para distinguir entre situaciones. Así que, aunque la capacidad de hacer cálculo integral, o incluso la simple multiplicación, no es innata, uno podría argumentar que los fundamentos de la aritmética — a partir de la cual la comunidad mundial de matemáticos ha construido un edificio tan maravilloso de pensamiento abstracto — son innatos. Los enteros no son formas platónicas ideales que existen independientemente de la conciencia humana; más bien son creaciones de nuestras mentes, artefactos de la forma en que los cerebros de nuestros antepasados interpretaban el mundo a su alrededor.

Si esto es correcto, entonces surge una pregunta fascinante: ¿cómo serían las matemáticas de una CET? ¿Habrían desarrollado el teorema del número primo; el teorema mín-máx; el teorema de los cuatro colores? Si su historia evolutiva fuera completamente diferente de la nuestra, entonces quizás no. ¿Por qué debería?[145] Si evolucionaron en un entorno en el que las variables cambiaban continuamente en lugar de discretamente, entonces quizás no inventarían el concepto de un número entero. O quizás es posible desarrollar un sistema matemático basado en los conceptos de forma y tamaño, en lugar de numerar y establecer como lo han hecho los humanos. Personalmente me resulta difícil imaginar una matemática tan extraña, pero eso es casi seguro que es una deficiencia en mi imaginación; no prueba que sea imposible que existan sistemas tan diferentes.[146]

Nada de esto quiere decir que nuestras propias matemáticas estén *equivocadas*. Seguramente la relación $e^{\pi i} = -1$ es verdadera e inevitable en cualquier parte del Universo. (Al menos, no veo cómo podría ser de otra manera.) Pero otras inteligencias, que tienen una historia evolutiva diferente, pueden simplemente no ver la relevancia de conceptos como e o π o i o -1.

Igualmente, pueden tener conceptos —importantes en sus propios ambientes— que hemos fallado en inventar.

El punto aquí es que las matemáticas humanas nos permitieron desarrollar tecnología. Tal vez este tipo de matemáticas sea *necesario* para el desarrollo de la tecnología. Para que una civilización construya transmisores de radio capaces de transmitir sobre distancias interestelares, simplemente tiene que entender la ley del cuadrado inverso y una multitud de otras matemáticas "terrestres". Una solución a la paradoja de Fermi, entonces, podría ser que otras civilizaciones desarrollen otros sistemas de matemáticas — sistemas que son inaplicables para el uso en la construcción de la comunicación interestelar o dispositivos de propulsión.

* * *

Como una resolución a la paradoja esto sufre de la misma dificultad que varios otros: incluso si se aplica a algunas civilizaciones (y muchos negarían incluso esa posibilidad), seguramente no puede aplicarse a todas las civilizaciones. Puedo imaginar una raza de criaturas inteligentes que viven en el océano desarrollando un sistema matemático sin el teorema de Pitágoras (¿conocerían siquiera los ángulos rectos?), pero no todas las especies vivirán en el océano; algunas serán criaturas terrestres, como nosotros, y parece razonable suponer que al menos algunas de ellas desarrollarían matemáticas familiares.

Un último pensamiento. Las matemáticas, en el fondo, son patrones. Incluso si las matemáticas mismas son universales, tal vez diferentes inteligencias aprecian e investigan diferentes tipos de patrones. No podría haber nada más interesante para los matemáticos que aprender sobre diferentes sistemas matemáticos. Para mí, esto hace que parezca aún más probable que las CETs quieran comunicarse entre sí.

SOLUCIÓN 25: ESTÁN LLAMANDO PERO NO RECONOCEMOS LA SEÑAL

Realmente no veo la señal.
Nelson,
en la batalla de Copenhague

Hay un argumento más sutil relacionado con la sección anterior. Supongamos que las CETs avanzadas sí crean matemáticas "diferentes", o — lo que es más fácil de aceptar y puede equivaler a lo mismo — supongamos que sus matemáticas están millones de años más avanzadas que las nuestras. Si nos estuvieran transmitiendo en este momento, ¿reconoceríamos que sus transmisiones son artificiales?

Gran parte del esfuerzo actual de SETI se concentra en la región del pozo de agua y en múltiplos simples de la frecuencia de la línea de hidrógeno (2, 3, *n* veces la frecuencia, y así sucesivamente). Quizás las CETs que usan una matemática diferente no ven nada especial en tales frecuencias; las frecuencias "obvias" para ellos podrían ser algo muy diferente. Pero este es un punto menor; supongamos que se emiten en la región de la charca. La esperanza de comunicarse con las CETs se basa en encontrar señales que contengan patrones matemáticos simples y desarrollar a partir de esto un lenguaje compartido. En otras palabras, esperamos recibir señales codificadas en algún lenguaje matemático como el LINCOS de Freudenthal.[147] ¿Es razonable esta esperanza?

Hay dos aspectos de esta cuestión, que debemos mantener separados. Primero, ¿podríamos reconocer una señal como artificial? Segundo, si reconocemos una señal, ¿podemos decodificar su significado?

Los esfuerzos de los científicos del SETI están condenados si no pueden distinguir entre una transmisión artificial y una emisión natural. Sin embargo, los físicos han demostrado que si un mensaje es enviado electromagnéticamente y ha sido codificado para una eficiencia óptima, entonces un observador ignorante del esquema de codificación encontrará que el mensaje es indistinguible de la radiación de cuerpo negro.[148] Ahora, la radiación de cuerpo negro es simplemente la radiación que emite un objeto porque está caliente; los astrónomos detectan la radiación de cuerpo negro todo el tiempo, y por supuesto aplican la explicación más simple a sus observaciones. ¡Pero *podrían* estar observando mensajes que han sido codificados para una eficiencia óptima! Si a las CETs no les importa que sepamos de ellos, y si codifican sus comunicaciones entre sí con una eficiencia óptima, entonces podríamos interceptar sus mensajes y permanecer inconscientes de su existencia. Es otra dificultad más que los científicos del SETI deben enfrentar.

Si las CETs avanzadas *quieren* que los encontremos, entonces podrían

fácilmente codificar mensajes que reconoceríamos como artificiales. Una señal que contenga pulsos distribuidos de acuerdo a un patrón obvio — digamos los primeros números primos — no dejaría ninguna duda en nuestras mentes acerca de su origen. Por lo tanto, tenemos que esperar que se preste atención a las CETs. Pero incluso si detectamos un mensaje, ¿podríamos decodificar el contenido?

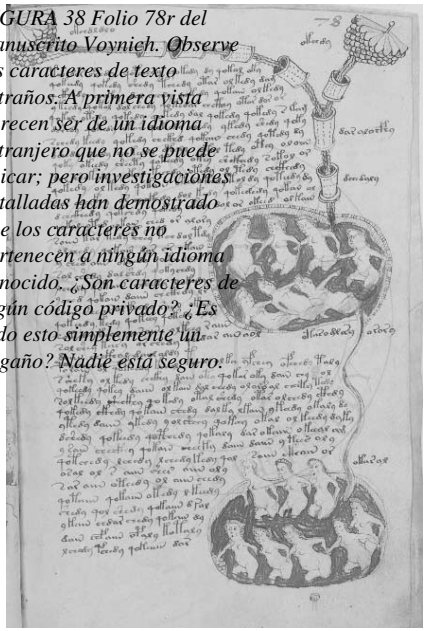


FIGURA 38 Folio 78r del manuscrito Voynich. Observe los caracteres de texto extraños. A primera vista parecen ser de un idioma extranjero que no se puede ubicar; pero investigaciones detalladas han demostrado que los caracteres no pertenecen a ningún idioma conocido. ¿Son caracteres de algún código privado? ¿Es todo esto simplemente un engaño? Nadie está seguro.

Consideremos el Manuscrito Voynich.[149] En 1912, Wilfred Voynich, un coleccionista, compró este libro de 234 páginas en el Colegio Jesuita de Villa Mondragone, Frascati, en Italia. Actualmente reside en la Sala de Libros Raros y Biblioteca de la Universidad de Yale, donde está catalogada con el nombre menos romántico de MS 408. El libro fue escrito probablemente entre el siglo XIII y 1608. Y esto es casi todo lo que sabemos sobre el manuscrito: estaba escrito en un lenguaje o código que nadie ha descifrado todavía. Parece contener información sobre el herbolario y la astrología, entre otras cosas, pero nadie está seguro; podría ser, por ejemplo, un engaño medieval.

Cualquiera que sea la información que contenga el manuscrito Voynich, sabemos que fue escrito por un ser humano en un pasado no muy lejano. Así que el autor tuvo las mismas aportaciones sensoriales que el resto de nosotros; un trasfondo cultural que es reconocible, si no idéntico al nuestro; emociones humanas que lo impulsaron exactamente de la misma manera que nos impulsan a nosotros. Y aun así escribió un libro que no podemos descifrar. Si tal situación puede ocurrir con un miembro de nuestra propia especie, ¿qué posibilidades tenemos de entender un mensaje de una CET?

Si los alienígenas existen, entonces poseerán diferentes órganos sensoriales, diferentes emociones, diferentes filosofías y, quizás, incluso

diferentes matemáticas. Sospecho que si los astrónomos alguna vez detectan un mensaje de extraterrestres inteligentes, la emoción dominante que la humanidad sentiría — después de un período inicial de excitación y euforia — sería la frustración. Podríamos luchar durante milenios sin descifrar el significado del mensaje.

Pero, ¿algo de esto tiene relevancia para la paradoja de Fermi? Bueno, un escenario que la gente ha ofrecido es que las CETs hace mucho tiempo se dieron cuenta de que los viajes interestelares eran imposibles, se pusieron en contacto entre sí a través de señales EM y, a través de los eones, acordaron comunicarse entre sí con señales codificadas para una eficiencia óptima. Entonces perdieron interés en contactar con civilizaciones más jóvenes como la nuestra, así que encontramos la Galaxia llena de radiación de cuerpo negro. Puede que eso haya sucedido, pero es otro ejemplo de una historia "perfecta"; no ofrece una predicción comprobable.

Por otro lado, si detectamos una señal de origen claramente artificial, entonces, aunque no pudiéramos descifrarla, podríamos inferir la existencia de seres extraterrestres inteligentes. Por lo tanto, si podemos entender a los extraterrestres es una cuestión muy distinta de si existen y no tiene ninguna relación real con la paradoja de Fermi.

SOLUCIÓN 26: ESTÁN EN ALGÚN LUGAR PERO EL UNIVERSO ES MÁS EXTRAÑO DE LO QUE IMAGINAMOS

Escuchen: hay un infierno de un buen universo al lado; vamos.
E. E. Cummings,
compadece a este monstruo ocupado, manunkind

Las teorías de la física moderna son notables en su campo de aplicación. Explican fenómenos a escalas tan pequeñas como el electrón y tan grandes como los superclusters de galaxias. Ellos explican eventos que sucedieron una pequeña fracción de segundo después del Big Bang, y podemos usarlos para determinar el destino del Universo.

Algunos podrían decir que los físicos son arrogantes, llenos de arrogancia por atreverse a reclamar tanto éxito para sus teorías; la ciencia, siendo el producto del cerebro humano, no puede capturar las sutilezas y misterios del Universo. En mi experiencia, estas personas tienden a aceptar la explicación OVNI de la paradoja Fermi. Sin embargo, algunos científicos y muchos escritores de SF han ofrecido algunas sugerencias interesantes. Explican la paradoja suponiendo que el Universo no es exactamente lo que los físicos piensan que es.[150]

Por ejemplo, quizás las especies inteligentes evolucionan a un estado no físico que trasciende las limitaciones del espacio-tiempo. La novela de Clarke *El fin de la infancia* describe la transición de la humanidad de nuestro estado inmaduro actual a una fusión con la "súper-mente" galáctica (algún tipo de unión espiritual, cuya naturaleza precisa no está clara). Según esta sugerencia, no escuchamos de las CETs porque han evolucionado más allá de nuestra existencia secular.

Otra sugerencia: todas las demás inteligencias desarrollan habilidades telepáticas y pueden comunicarse directamente, de mente a mente, incluso a distancias interestelares. No tendrían las dificultades de la comunicación por radio. Tal vez incluso viajan usando el poder de la mente — como la excursión en la novela *Las estrellas, mi destino* de Bester. Si esto fuera cierto, las CETs podrían no estar al tanto de nuestra existencia desafiada por la psi.

Otra sugerencia, igual de escandalosa, pero basada en ideas más convencionales, es que las CETs están ocupadas explorando universos paralelos. *La interpretación de la mecánica cuántica de muchos mundos* sugiere que cada vez que hacemos una medición en un sistema cuántico que posee dos estados posibles, el Universo se divide — en el universo A y el universo B.[151] Un observador en el universo A mide un resultado de un experimento, un observador en el universo B mide el otro resultado posible. El resultado es una ramificación interminable de los universos. En la totalidad de los universos, se realizan todas las posibilidades. Si la interpretación de muchos mundos es correcta (un gran "si" — existen varias interpretaciones

opuestas de la mecánica cuántica, y no hay evidencia directa a favor de la interpretación de muchos mundos) y si es posible moverse entre universos (un "si" absolutamente enorme — no hay indicación de que tal viaje pueda ocurrir), entonces quizás las CETs estén en otra parte. ¿Por qué quedarse en un lugar tan aburrido como este Universo cuando se pueden explorar lugares realmente interesantes?

* * *

Si bien es cierto que la ciencia no nos lo ha dicho *todo* —de hecho, lo que queda por descubrir parece crecer exponencialmente-, es un error decir que la ciencia no nos ha dicho *nada*. El Universo parece ser inteligible; y durante los últimos 400 años nuestro proceso científico —que involucra a cientos de miles de personas que trabajan individual y cooperativamente— ha producido un conocimiento confiable sobre el Universo. Cualquier nueva teoría no sólo tiene que explicar nuevas observaciones y hallazgos experimentales, sino también el conjunto acumulado de observaciones y hallazgos, lo que hace extremadamente difícil desarrollar nuevas teorías. Nadie ha logrado desarrollar teorías útiles de fenómenos como las uniones espirituales trascendentes, la comunicación telepática interestelar, los viajes inter-universos — o cualquier otra sugerencia imaginativa que los escritores de SF hayan hecho. De hecho, puesto que en la actualidad podemos entender el Universo sin invocar la existencia de tales fenómenos, no *necesitamos* desarrollar nuevas teorías para explicarlos. (Esto no significa que tales fenómenos sean imposibles; pero requerimos evidencia antes de que necesitemos estudiarlos seriamente.

Por lo tanto, aunque todas estas sugerencias son buenas historias, es difícil tomarlas en serio como resoluciones de la paradoja de Fermi.

SOLUCIÓN 27: UNA ELECCIÓN CATASTRÓFICA

...culpamos de nuestros desastres al sol, a la luna y a las estrellas;
como si fuéramos villanos por necesidad, tontos por obligación celestial.

William Shakespeare,
Rey Lear, Acto I, Escena 2

Una resolución obvia, aunque sombría, de la paradoja de Fermi se produce si *L* —el factor que denota la vida útil de la fase de comunicación de una CET— es pequeño. En el capítulo 5 trataré de las diversas maneras en que la Naturaleza es hostil a la vida. Aquí, sin embargo, quiero examinar la idea de que las especies inteligentes pueden ser las autoras inevitables de su propio destino.[152]

A más de unos pocos científicos que trabajaron durante la Guerra Fría les pareció bastante seguro que las CET descubrirían las interesantes propiedades del elemento 92 (conocido por nosotros como uranio) y, por lo tanto, aprenderían a construir armas nucleares. Para varios científicos, entonces, la razón de una corta vida (en otras palabras, un pequeño valor para *L*) era obvia: todas las civilizaciones avanzadas inevitablemente se aniquilan a sí mismas en un holocausto nuclear, como la raza humana estaba aparentemente a punto de demostrar.[153]

FIGURA 39 Una explosión termonuclear de 350 kTon (mediados de los años 1950).

No parece que valga la pena mencionar que, dependiendo de la gravedad de una guerra nuclear, la extinción de una especie inteligente podría seguir.[154] Los arsenales del mundo todavía contienen muchos miles de armas nucleares, y si alguna vez se usaran en grandes cantidades, entonces ciertamente destruirían el *Homo sapiens*. Una guerra nuclear limitada podría ser igual de ruinosa para nuestra especie, debido a los efectos de un posible invierno nuclear mundial.[155]

Sin embargo, como muchos escritores del SF han demostrado, es posible imaginar escenarios en los que los miembros de una especie en guerra sobreviven a una guerra limitada y, durante un período de miles de años, recrean su civilización. Una de las primeras novelas post-apocalípticas, y ciertamente una de las mejores, es *Un Cántico por Leibowitz* (*A Canticle for Liebowitz*), de Miller. Miller describe cómo un destello de conocimiento es preservado por los monjes después de que una guerra nuclear ha diezmado a

la población.[156] En *Cántico*, la humanidad finalmente redescubre el poder de la ciencia y, unos pocos milenios después del primer holocausto nuclear, ha "avanzado" hasta el punto en que la Bomba puede ser lanzada una vez más. ¿Está la urgencia de la guerra tan profundamente *arraigada* que una civilización no aprende nada? ¿Están las civilizaciones obligadas a lanzar bombas tan pronto como puedan? A menos que ese sea el caso, una guerra nuclear limitada no puede proporcionar una explicación de la paradoja. Puede tomar muchos miles de años recuperar un alto nivel de civilización después de una guerra nuclear limitada, pero esta escala de tiempo es corta — sólo unos pocos minutos del Año Universal.

Incluso una guerra nuclear total, total y sin restricciones no destruiría toda la vida en un planeta. Considere el organismo *Deinococcus radiodurans*. Los científicos lo aislaron por primera vez en 1956 de una lata de carne de res molida; la carne de res había sido esterilizada por radiación, pero la carne todavía se había estropeado. Resulta que *D. radiodurans* puede sobrevivir a una exposición a la radiación gamma de 1,5 millones de rads. (En comparación, una dosis de 1.000 rads suele ser suficiente para matar a un hombre.) La exposición a la radiación intensa destruye su ADN — pero en pocas horas el organismo reforma todo su genoma sin efectos aparentemente nocivos. Este organismo puede soportar otras condiciones extremas, como la desecación prolongada, lo que explica por qué a menudo se le llama "Conan la Bacteria". Una guerra nuclear no incomodaría indebidamente a Conan la Bacteria. Y no sólo las bacterias sobrevivirían; varios otros organismos vivirían una guerra nuclear. Si la inteligencia es un resultado inevitable de la evolución (esto es polémico, como veremos, pero es presumiblemente el punto de vista de aquellos que argumentan que hay un millón de CETs en la galaxia), entonces la espera para que la inteligencia emerja después de un holocausto nuclear no sería interminable: unos pocos cientos de millones de años, tal vez. Este es un tiempo inimaginablemente vasto a escala humana, pero, una vez más, no es particularmente significativo cuando se lo compara con la era de la Galaxia — unos pocos días en el Año Universal.

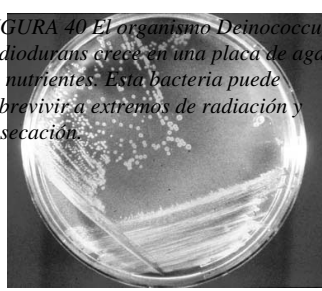


FIGURA 40 El organismo Deinococcus radiodurans crece en una placa de agar de nutrientes. Esta bacteria puede sobrevivir a extremos de radiación y desecación.

Aquellas civilizaciones que evitan la Escila de la guerra nuclear aún deben navegar por los Caribdis de la guerra biológica y química. Por ejemplo, sabemos que las armas químicas pueden utilizarse para desestabilizar los ecosistemas; las armas biológicas diseñadas genéticamente pueden destruir los

suministros de alimentos o diezmar las poblaciones directamente. Pero los comentarios hechos anteriormente con respecto a la guerra nuclear también son válidos para estas formas de guerra. ¿Es probable que *cada* civilización CET, cuando llega a una cierta etapa (y antes de establecer colonias en el espacio), se aniquile a sí misma a través de la guerra? Sin querer tentar al destino, podemos esperar que el *Homo sapiens* haya demostrado que al menos una especie en la Galaxia puede resistir el impulso de autodestruirse a través de la guerra.

Superpoblación

Una de las características que definen la vida en la Tierra es la reproducción. Presumiblemente esta es una característica universal de la vida. Si alguna vez nos encontramos con el equivalente de los krell del *Planeta Prohibido*, los blandos de *Los Dioses Mismos*, o los Greeshka de *A Song for Lya*, entonces nos sorprenderá la mecánica de sus procesos reproductivos, pero no el hecho de que se reproduzcan. Y como los alienígenas se reproducirán, estarán sujetos a las mismas simples leyes matemáticas que describen el crecimiento de la población aquí en la Tierra.

Hasta aproximadamente el año 8000 a.C., el número de personas en la Tierra en cualquier momento nunca excedió los 10 millones de personas. La salud es mala y las condiciones de vida son duras; la esperanza de vida al nacer es probablemente de 30 años o menos. Si la tasa de natalidad no hubiera sido tan alta como la tasa de mortalidad, la sociedad humana se habría extinguido; para que las familias, los clanes y las tribus siguieran existiendo, era vital que los adultos tuvieran el mayor número posible de hijos. Aun así, la tasa de crecimiento de la población era apenas superior a cero. La situación comenzó a cambiar cuando la humanidad desarrolló la agricultura. La esperanza de vida comenzó a aumentar bajo un estilo de vida agrícola, y la tasa de natalidad comenzó a superar la tasa de mortalidad. (Por lo general, la gente se apresura a adoptar nuevas tecnologías; las actitudes sociales, como "fructificar y multiplicarse", tardan más en cambiar. Así que aunque las razones para tener familias numerosas habían disminuido, las presiones sociales sobre los padres no lo habían hecho. Afortunadamente, la agricultura mantenía una población mayor que el viejo modo de vida de los cazadores y recolectores; para 1650, la población mundial era de 500 millones de personas, lo que representaba un aumento de 50 veces el tamaño de la población del 99% de la historia de la humanidad. Hacia 1800, la población mundial alcanzó sus primeros 1.000 millones de habitantes, cifra que se duplicó en 150 años. En 1930, la población era de 2.000 millones de habitantes, cifra que se duplicó en 130 años. En 1975, la población era de 4.000 millones de habitantes, cifra que se duplicó en sólo 45 años. La población mundial superaba los 6.000 millones de habitantes en septiembre de 1999.

Decir que esta tasa pasada de crecimiento de la población no puede continuar es arriesgarse a ser etiquetado como Cassandra. Pero *no puede* continuar. *Realmente*. A esas tasas de crecimiento, en unos pocos cientos de años la carne combinada de la humanidad formaría una esfera expandiéndose a la velocidad de la luz. (Por supuesto, esto no sucedería; si no ralentizáramos la tasa de crecimiento, entonces la biología la frenaría mucho antes de que los efectos relativistas se hicieran evidentes.

Si tenemos suerte, la población mundial alcanzará en las próximas décadas una nueva situación estable, con una baja tasa de mortalidad y una baja tasa de natalidad. (Aunque incluso esto no satisfaría a los Cassandras, ya que hay desventajas en esta situación. Por ejemplo, las personas mayores consumirían una gran parte de los costosos servicios públicos, mientras que habría menos jóvenes para trabajar y pagar por ellos. La población del estado estacionario estará probablemente en el rango de 11 a 13 mil millones. No se sabe si la Tierra puede alimentar a tanta gente y ofrecerles un nivel de vida razonable. Pero incluso si puede, ¿qué daño le infligirán 13.000 millones de personas? Una población mucho menor ha logrado transformar o degradar hasta la mitad de la superficie terrestre para uso agrícola y urbano; hemos aumentado la concentración de CO_2 en la atmósfera a un ritmo alarmante; ya utilizamos más de la mitad del agua dulce de la superficie accesible; el ritmo natural de extinción de especies se ha acelerado debido a la actividad humana; y así sucesivamente, y así sucesivamente. Ninguno de estos problemas (por no mencionar los problemas como la pobreza y la injusticia social) son causados únicamente por la sobrepoblación; pero la sobrepoblación ciertamente no ayuda en la búsqueda de soluciones.

Dado que la vida alienígena se reproducirá, parece inevitable que en algún momento una CET se enfrente a una crisis de población. Pero, ¿fallarán *todas* las civilizaciones en negociar la crisis?

El Problema de la Plaga Gris (*Gray Goo*)

La nanotecnología parece ser el resultado natural de avances convergentes en muchos campos diferentes del conocimiento.[157] El término se refiere a la ingeniería que tiene lugar en la nanoescala, una escala en la que las dimensiones de los objetos se miden típicamente en nanómetros (milmillonésimas de metro). Dado que las moléculas son de este tamaño, también se le conoce como ingeniería molecular. Los futuros nanotecnólogos tendrán la capacidad de ensamblar moléculas hechas a medida en sistemas grandes y complejos; su capacidad de crear materiales será casi mágica. (Puesto que esta capacidad parece ser tan maravillosa, y aún así está más allá de nuestras capacidades, varios comentaristas son escépticos con respecto a la nanotecnología. Por lo tanto, vale la pena subrayar que no parece haber ninguna razón fundamental por la que no podamos desarrollar la tecnología. La propia naturaleza es un "nanoingeniero": las enzimas, por ejemplo, son

dispositivos nanotecnológicos que emplean técnicas bioquímicas para llevar a cabo sus tareas. Si la naturaleza puede hacerlo, nosotros también. También vale la pena destacar que el éxito o el fracaso de la nanotecnología determinará si alguna vez desarrollamos sondas Bracewell-von Neumann.

Es probable que uno de los elementos de cualquier nanotecnología futura sea el *nanorobot*, o nanobot, para abreviar. Aunque su desarrollo está muy lejos, los estudios teóricos sugieren que podríamos construir nanobots a partir de uno de varios materiales — con materiales ricos en carbono y diamondoides que quizás formen la base de muchos tipos de nanobots. Los estudios también sugieren que uno de los tipos más útiles de nanobot será una máquina auto-replicante.

Las campanas de alarma comienzan a sonar cuando se menciona la auto-replicación. El peligro inherente a la producción de un nanobot auto-replicante en el laboratorio es evidente al responder a la siguiente pregunta: ¿Qué sucede cuando un nanobot se escapa al mundo exterior? Para poder replicarse, un nanobot hecho de un material rico en carbono necesitaría una fuente de carbono. Y la mejor fuente de carbono sería la biosfera de la superficie de la Tierra: plantas, animales, seres humanos, seres vivos en general. Los enjambres de nanobots (pues pronto habría muchas copias del original) desmantelarían las moléculas del material vivo y utilizarían el carbono para producir más copias de sí mismos. La biosfera de la superficie se convertiría del ambiente rico y variado que vemos hoy en día en un mar de nanobots voraces más lodo de desecho. Este es el problema de la plaga gris.

Como se mencionó anteriormente en la discusión sobre la sobrepoblación, el crecimiento exponencial es algo poderoso. Freitas ha demostrado que, en condiciones ideales, una población de nanobots que crece exponencialmente ¡podría convertir toda la biosfera de la superficie en menos de tres horas![158] Podemos añadir esto, entonces, a la deprimente lista de formas en que la vida útil de la fase de comunicación de una CET podría acortarse: un accidente de laboratorio, que implica la fuga de un nanobot, convierte su biosfera en lodo.

Esta solución a la paradoja, que ha sido seriamente propuesta, sufre el mismo problema que muchas otras soluciones: aunque puede ocurrir, no es convincente como solución "universal". No todos las CET sucumbirán a la plaga gris.

* * *

El joven de *Annie Hall*, de Woody Allen, se deprime al pensar que el Universo va a morir, ya que eso será el final de todo. Me estoy deprimiendo escribiendo esta sección, así que para alegrarme — y a cualquier joven Woody que pueda estar leyendo — creo que tenemos que preguntarnos si el problema de la plaga gris tiene alguna remota posibilidad de surgir. Como Asimov era aficionado a señalar, cuando el hombre inventó la espada también inventó el protector de la mano para que los dedos no se deslizaran por la hoja cuando se empujaba a un oponente. Los ingenieros que desarrollan la

nanotecnología tienen la certeza de desarrollar sofisticadas salvaguardas. Incluso si los nanobots auto-replicantes escaparan o si fueran liberados por razones maliciosas, entonces se podrían tomar medidas para destruirlos antes de que se produjera la catástrofe. Una población de nanobots que aumenta su masa exponencialmente a expensas de la biosfera sería detectada inmediatamente por el calor residual que genera. Las medidas de defensa podrían ser desplegadas de inmediato. Un escenario más realista, en el que una población de nanobots aumentara su masa lentamente, de modo que el calor residual que generaban no fuera inmediatamente detectable, llevaría años convertir la biomasa de la Tierra en nanomasa. Eso daría mucho tiempo para montar una defensa efectiva. El problema de la plaga gris podría no ser un problema tan difícil de superar: es simplemente un riesgo más con el que tendrá que vivir una especie con tecnología avanzada.

Física de Partículas — ¿Una Disciplina Peligrosa?

En 1999, el London Times informó que los experimentos en el nuevo *Relativistic Heavy Ion Collider* (RHIC) en Long Island podrían desencadenar una catástrofe. Los físicos de la RHIC aceleran los núcleos de oro hasta alcanzar altas energías y luego los aplastan unos contra otros; es una forma eficaz de aprender sobre los componentes fundamentales de la materia. Se sugirió que los experimentos de la RHIC podrían destruir la Tierra. Esto llevó inmediatamente a algunos a sugerir otra de las soluciones del "día del juicio final" a la paradoja de Fermi: las civilizaciones avanzadas aprenden a experimentar en física de partículas de alta energía y se destruyen a sí mismas cuando un experimento sale mal.[159]

Estas preocupaciones no son nuevas. En 1942, Teller se preguntó si las altas temperaturas de una explosión nuclear podrían desencadenar un incendio autosuficiente en la atmósfera terrestre. Los cálculos de los físicos, incluyendo a Fermi, tranquilizan: una bola de fuego nuclear se enfría demasiado rápido como para prender fuego a la atmósfera.

FIGURA 41 Los físicos estudian las interacciones de partículas en laboratorios como el CERN. Las partículas se aceleran hasta alcanzar altas energías en túneles circulares subterráneos profundos, y luego se chocan entre sí. (Los túneles del CERN, como el que se muestra aquí, están por debajo de las montañas del Jura.) Ni en el CERN ni en la RHIC las energías son lo suficientemente altas como para suponer una amenaza para nuestra existencia.

La ráfaga de preocupación por la RHIC comenzó cuando alguien calculó que las energías involucradas en los experimentos serían suficientes para crear un pequeño agujero negro. El temor era que el agujero negro hiciera un túnel desde Long Island hasta el centro de la Tierra y procediera a devorar nuestro planeta. Afortunadamente, como los cálculos más sensatos mostraron rápidamente, esencialmente no hay ninguna posibilidad de que esto ocurra. Para crear el agujero negro más pequeño que pueda existir se requieren energías aproximadamente 10 millones de veces mayores que las que puede generar la RHIC.[160] (Incluso si un acelerador de partículas *pudiera* generar tales energías, el agujero negro que produce sería una cosa insignificante, con una existencia fugaz. Lucharía por consumir un protón, por no hablar de la Tierra.)

De este modo podemos dormir tranquilos, seguros sabiendo que la RHIC no producirá un agujero negro. También podemos estar seguros de que no destruirá la Tierra mediante la producción de *estranguladores*, es decir, trozos de materia que contienen los llamados quarks extraños, además de la disposición habitual de los quarks.[161] Hasta ahora nadie ha visto *estranguladores*, pero los físicos se preguntaban si los experimentos en la RHIC podrían producirlos. Si se produjeran estrangulamientos, se corre el riesgo de que reaccionen con núcleos de materia ordinaria y los conviertan en materia extraña: una reacción en cadena podría entonces transmutar todo el planeta en materia extraña. Sin embargo, habiendo planteado la posibilidad de una catástrofe, los físicos se apresuraron a tranquilizar a todos. Los cálculos muestran que es casi seguro que los *estranguladores* son inestables; incluso si son estables, es casi seguro que la RHIC no tendría la energía para crearlos; e

incluso si fueran creados en la RHIC, su carga positiva haría que fueran protegidos de las interacciones por una nube de electrones circundante.[162]

La improbable letanía de catástrofes que la RHIC (y otros aceleradores de partículas) podría infligirnos no termina con agujeros negros y estrangulamientos. Paul Dixon, un psicólogo con un conocimiento confuso de la física, cree que las colisiones en el acelerador de partículas Tevatron en Fermilab podrían desencadenar el colapso del estado de vacío cuántico.

Un vacío es simplemente un estado de menor energía. Según las teorías cosmológicas actuales, el Universo primitivo puede haber quedado atrapado brevemente en un estado metaestable: un falso vacío. El Universo finalmente pasó por una transición de fase al actual "verdadero" vacío, desatando en el proceso una cantidad colosal de energía — es similar a lo que sucede cuando el vapor pasa por una transición de fase para formar agua líquida. ¿Pero qué pasa si nuestro vacío actual no es el vacío "verdadero"? Rees y Hut publicaron un artículo en 1983 sugiriendo que este podría ser el caso.[163] Si existe un vacío más estable, entonces es posible que una "sacudida" haga que nuestro Universo forme un túnel hacia el nuevo vacío — y el punto en el cual ocurre la sacudida vería una onda destructiva de energía esparcida hacia afuera a la velocidad de la luz. Las mismas leyes de la física cambiarían en la estela de la ola del verdadero vacío.

Dixon pensó que los experimentos en el Tevatron podrían causar una sacudida que podría colapsar el vacío. Estaba tan preocupado que se puso a piquetear a Fermilab con una pancarta casera que decía "Hogar de la próxima supernova".[164] Una vez más, sin embargo, no necesitamos preocuparnos indebidamente por un apocalipsis inducido por un acelerador. Como señalaron Rees y Hut en su documento original, a través del fenómeno de los rayos cósmicos, la Naturaleza ha estado llevando a cabo experimentos de física de partículas durante miles de millones de años con energías mucho más altas que cualquier cosa que la humanidad pueda lograr.[165] Si las colisiones de alta energía hubieran hecho posible que el Universo hiciera un túnel hacia el "verdadero" vacío — bueno, los rayos cósmicos habrían causado que los túneles ocurrieran hace mucho tiempo.

El concepto de un accidente con un acelerador que causa la destrucción de un mundo (o de todo el Universo, en el caso de un colapso del vacío) es realmente un no-inicio. La física de estos eventos no se conoce perfectamente — es por eso que los físicos están llevando a cabo la investigación — pero son lo suficientemente conocidos como para que nos demos cuenta de que los condenados lo tienen mal en este caso. Tenemos que buscar en otra parte una solución a esta paradoja.

El Juicio Final y el Argumento del Delta *t*

Hay muchas maneras en que la humanidad podría destruirse a sí misma. Además de las calamidades mencionadas anteriormente, se podría añadir el

deterioro genético, la sobreestabilización, las epidemias o una docena de otros problemas. Y esto sin mencionar los muchos factores externos que nos amenazan, como el impacto de los meteoritos, la variabilidad solar y los estallidos de rayos gamma. Apenas parece valer la pena levantarse de la cama por la mañana. Sin embargo, seguramente una especie inteligente como el Homo sapiens aprenderá a navegar en estos problemas. Notablemente, hay una línea de razonamiento, llamada el argumento delta *t*, que sugiere que no.

* * *

En 1969, cuando era estudiante, Richard Gott visitó el Muro de Berlín. En aquel momento estaba de vacaciones en Europa, y su visita al Muro fue una de varias excursiones; por ejemplo, había visto a Stonehenge, de 4.000 años de edad, y quedó convenientemente impresionado. Mientras miraba la Muralla, se preguntó si este producto de la Guerra Fría duraría tanto como Stonehenge. Un político experto en los matices de la diplomacia de la Guerra Fría y conocedor de la relativa fuerza económica y militar de las partes enfrentadas podría haber hecho una estimación informada (lo que, a juzgar por el historial de los políticos, habría sido erróneo). Gott no tenía esa experiencia especial, pero razonó de la siguiente manera:[166]

Primero, estaba allí en un momento aleatorio de la existencia de la Muralla. No estaba allí para ver la construcción del Muro (que ocurrió en 1961), ni estaba allí para ver la demolición del Muro (que ahora sabemos que ocurrió en 1989); simplemente estaba allí de vacaciones. Por lo tanto, continuó, había una probabilidad de 50:50 de que estuviera mirando a la Muralla durante los dos cuartos de su vida útil. Si él estaba allí al principio de este intervalo, entonces la Muralla debe haber existido durante 1/4 de su vida útil, y 3/4 de su vida útil permaneció. En otras palabras, el Muro duraría 3 veces más de lo que ya había existido. Si estaba allí al final de este intervalo, entonces la Muralla debe haber existido durante 3/4 de su vida útil, y sólo quedaba 1/4. En otras palabras, el Muro duraría sólo 1/3 del tiempo que ya había existido. El Muro tenía 8 años cuando Gott lo vio. Por lo tanto, predijo, en el verano de 1969, que había un 50% de posibilidades de que el Muro durara otros 2,66 a 24 años (8 × 1/3 años a 8 × 3 años). Como recordará cualquiera que haya visto las dramáticas imágenes de televisión, el Muro se derrumbó 20 años después de su visita, dentro de los límites de su predicción.

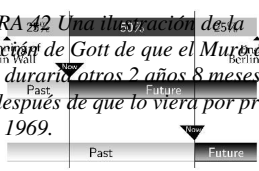


FIGURA 42 Una ilustración de la predicción de Gott de que el Muro de Berlín duraría otros 2 años 8 meses a 24 años después de que lo viera por primera vez en 1969.

Gott dice que el argumento que utilizó para estimar la vida útil del Muro de Berlín puede aplicarse a casi cualquier cosa. Si no hay nada especial en su observación de una cosa, entonces, en ausencia de conocimiento relevante,

esa cosa tiene un 50% de probabilidad de durar entre 1 y 3 veces su edad actual.

En física, es una práctica estándar hablar de predicciones que tienen un 95% de probabilidades de ser correctas, en lugar de un 50%. El argumento de Gott sigue siendo el mismo, pero hay un ligero cambio en los números: si no hay nada especial en su observación de una entidad, entonces esa entidad tiene un 95% de posibilidades de durar entre 1/39 y 39 veces su edad actual. (Al aplicar la regla de Gott es importante recordar que la observación no debe tener un significado particular. Imagínate que te han invitado a una boda y, en la recepción, empiezas a charlar con una pareja que nunca has visto antes. Si le dicen que han estado felizmente casados por diez meses, entonces usted puede informarles que su matrimonio tiene un 95% de probabilidades de durar entre un poco más de una semana y 32,5 años. Por otro lado, no se puede predecir cuánto tiempo estarán juntos el novio y la novia: están en la boda precisamente para observar el comienzo del matrimonio. La falla en la aplicación de la regla a los funerales debe ser obvia.

FIGURA 43 Un agujero en la pared. Hay un argumento notable que vincula la vida útil del Muro de Berlín con la de nuestra especie.

Usar el argumento delta *t* para estimar la longevidad de los muros de hormigón y las relaciones humanas es divertido, pero podemos usarlo para estimar algo más serio: la longevidad futura del *Homo sapiens*. Investigaciones recientes sugieren que nuestra especie tiene unos 175.000 años. Aplicando la regla de Gott, encontramos que hay un 95% de posibilidades de que la vida futura de nuestra especie se sitúe entre unos 4.500 y 6,8 millones de años. Esto haría que la longevidad de nuestra especie se sitúe entre 0,18 y 7 millones de años. (Compare esto con la longevidad promedio de las especies de mamíferos, que es de aproximadamente 2 millones de años. Nuestros parientes más cercanos, *Homo neanderthalensis*, sobrevivieron tal vez 200.000 años; *Homo erectus*, otra especie de Homínidos y posiblemente uno de nuestros antepasados directos, duró 1,4 millones de años. Así que la estimación de Gott está ciertamente en el estadio correcto

para la longevidad de las especies. El argumento no dice cómo vamos a llegar a nuestro fin; podría ser por uno o más de los métodos discutidos anteriormente, o por algo muy diferente. El argumento simplemente dice que es muy probable que nuestra especie perezca en algún momento entre 4.500 y 6,8 millones de años a partir de ahora.

Si esta es la primera vez que te encuentras con el argumento de Gott, entonces puedes pensar (como confieso que lo hice) que es una tontería. Sin embargo, es difícil precisar exactamente dónde falla la lógica. Las objeciones "obvias" al argumento han sido refutadas enérgicamente. Antes de examinar las posibles objeciones a la línea de razonamiento de Gott y las implicaciones del argumento delta *t* para la paradoja de Fermi, vale la pena considerar una versión ligeramente diferente de la misma idea.

Imagínate que eres un concursante en un nuevo programa de televisión. Las reglas del juego son simples. Dos urnas idénticas se colocan delante de ti y el anfitrión te dice que una urna contiene 10 bolas y la otra 10 millones de bolas. (Las bolas son pequeñas.) Las bolas de cada urna están numeradas secuencialmente (1, 2, 3, ..., 10 en una urna; 1, 2, 3,..., 10.000.000 en la otra). Tomas una bola al azar de la urna derecha y encuentras que la bola es la número 7, digamos. El objetivo del juego es apostar si la urna correcta contiene 10 bolas o 10 millones. Las probabilidades no son 50:50. Claramente, es mucho más probable que una bola de un solo dígito venga de la urna con 10 bolas que de la urna con 10 millones. Seguramente, apostarías en consecuencia.

Ahora, en vez de dos urnas considera dos posibles conjuntos de la raza humana, y en vez de bolas numeradas considera seres humanos individuales numerados de acuerdo a su fecha de nacimiento (así que Adán es 1, Eva es 2, Caín es 3, y así sucesivamente). Si uno de estos conjuntos corresponde a la raza humana real, entonces mi número personal será de unos 70.000 millones, al igual que cualquiera de los lectores de este libro, ya que del orden de 70.000 millones de personas han vivido desde el comienzo de nuestra especie. Ahora usa el mismo argumento que usamos con las urnas: es mucho más probable que tengas un rango de 70 mil millones si el número total de humanos que alguna vez vivirán es, digamos, 100 mil millones que si el número total es 100 billones. Si te vieras forzado a apostar, tendrías que decir que es probable que sólo vivan unas pocas decenas de miles de millones de personas más. (Algunas decenas de miles de millones de personas suenan mucho, pero al ritmo actual añadimos mil millones de personas a la población de la Tierra cada década.

El argumento delta *t* es una extensión del principio copernicano. El principio tradicional de Copérnico dice que no estamos ubicados en un punto especial en el espacio; Gott argumenta que no estamos ubicados en un punto especial en el tiempo. Un observador inteligente, como usted, gentil lector, debería considerarse elegido al azar del conjunto de todos los observadores inteligentes (pasados, presentes y futuros), cualquiera de los cuales usted

podría haber sido. Si crees que la humanidad sobrevivirá en un futuro indefinido, colonizará la galaxia y producirá 100 billones de seres humanos, tienes que preguntarte: ¿por qué tengo la suerte de estar entre el primer 0,07% de las personas que alguna vez vivirán?

Gott usa el mismo tipo de argumento probabilístico para deducir una variedad de características de la inteligencia galáctica, algunas de las cuales son directamente relevantes para la paradoja de Fermi. Todos ellos dependen de la idea de que usted es un observador inteligente al azar — sin una ubicación especial ni en el espacio ni en el tiempo. Primero, la colonización de la Galaxia no puede haber ocurrido a gran escala por CETs (porque si lo hubiera hecho, usted — sí, *usted* — probablemente sería miembro de una de esas civilizaciones). En segundo lugar, aplicando el argumento delta *t* a la longevidad pasada de la tecnología de radio en la Tierra y combinando esto con la ecuación de Drake, Gott encuentra en el nivel de confianza del 95% que el número de civilizaciones que transmiten radio es menos de 121 — y posiblemente mucho menos que esto, dependiendo de los parámetros alimentados en la ecuación de Drake. Tercero, si hay una gran dispersión en las poblaciones de CETs, entonces usted probablemente proviene de una CET que tiene una población más grande que la mediana. Por lo tanto, las CETs con poblaciones mucho más grandes que la nuestra deben ser raras — lo suficientemente raros como para que sus individuos no dominen el número total de seres, de lo contrario tú serías uno de ellos. De lo cual deducimos que probablemente no hay una civilización K2 que se encuentre en la Galaxia, ni una civilización K3 en ningún lugar del Universo observable.

Como he indicado antes, parece que hay algo que no está del todo bien con el argumento; se *siente* mal — pero ¿dónde exactamente está mal? Hay opiniones filosóficas tanto a favor como en contra del argumento del día del juicio final de Gott, y tal vez el curso de acción más seguro sea dejar que los filósofos le peguen. Personalmente, sin embargo, estoy incómodo con la suposición de que las especies inteligentes necesariamente tienen una vida finita; las observaciones recientes indican que el Universo puede expandirse para siempre, en cuyo caso es *posible* que la humanidad sobreviva para siempre (en cuyo caso la aplicación directa de un argumento del día del juicio final es problemática). ¿Cuál es la definición de humanidad en este caso? ¿Cuándo, exactamente, cree Gott que la humanidad "comenzó"? Y si nuestra especie evoluciona hacia otra cosa, ¿eso cuenta como el fin de la humanidad?

* * *

En esta sección se ha discutido una de las soluciones más frecuentes a la paradoja de Fermi: las CETs no permanecen mucho tiempo en la fase de radiotransmisión — y mucho menos en la fase de colonización — porque perecen. Hay una variedad de maneras en que esto puede suceder, pero ¿alguna de ellas es *inevitable*? Para que esta explicación funcione, la catástrofe debe ser inevitable.

SOLUCIÓN 28: LLEGAN A LA SINGULARIDAD

Las cosas no cambian; nosotros cambiamos.

Henry David Thoreau,
Walden

En 1965, Gordon Moore — el co-fundador de Intel Corporation — comentó cómo el número de transistores por centímetro cuadrado que podría caber en un circuito integrado parecía duplicarse cada 18 meses.[167] Esta observación se conoció como la ley de Moore, aunque por supuesto es más una observación que una ley de la naturaleza. En su encarnación actual, la ley de Moore establece que la densidad de datos se duplica cada 18 meses. La ley se ha mantenido vigente en los 36 años transcurridos desde su formulación, y algunas otras medidas de rendimiento del hardware de computación se han mantenido al día. El resultado: una potencia de computación barata y rápida está fácilmente disponible — y ha cambiado nuestro mundo. Si la ley continúa vigente durante la próxima década, y no parece haber ninguna razón para que no lo haga, entonces continuaremos viendo máquinas aún más rápidas y poderosas.[168]

Vernor Vinge, extrapolando las mejoras en el hardware informático y otras tecnologías durante las próximas décadas, argumenta que la humanidad probablemente producirá inteligencia sobrehumana algún tiempo antes de 2030.[169] Considera cuatro formas ligeramente diferentes en que la ciencia podría lograr este avance. Podríamos desarrollar ordenadores potentes que "despierten"; redes informáticas, como Internet, podrían "despertar"; interfaces humano-computadora podrían desarrollarse para que los usuarios se vuelvan sobrehumanamente inteligentes; y los biólogos podrían desarrollar formas de mejorar el intelecto humano. Tal entidad superinteligente podría ser el último invento de la humanidad, porque la propia entidad podría diseñar descendientes aún mejores y más inteligentes. El tiempo de duplicación de 18 meses en la ley de Moore disminuiría constantemente, causando una "explosión de inteligencia". Un evento de fuga más rápido de lo esperado podría poner fin a la era humana en cuestión de unas pocas horas. Vinge llama a tal evento la *Singularidad*.[170]

El término Singularidad es desafortunado, en el sentido de que matemáticos y físicos ya lo usan en un sentido específico: una singularidad ocurre cuando alguna cantidad se vuelve infinita. En la Singularidad de Vinge, sin embargo, ninguna cantidad necesita volverse infinita. Sin embargo, el nombre capta la esencia de lo que sería un punto crítico en la historia: las cosas cambiarían *muy* rápidamente en la Singularidad, y —como la singularidad en un agujero negro— se hace difícil predecir lo que sucede después de golpearla. Los ordenadores superinteligentes (o los humanos o seres humanos superinteligentes) se convierten en... ¿qué? Es difícil, quizás

imposible, imaginar las capacidades, los motivos y los deseos de las entidades que son el producto de este acontecimiento trascendental.[171]

Vinge argumenta que *si* la Singularidad es posible, *entonces* sucederá. Tiene algo del carácter de una ley universal: se producirá siempre que los ordenadores inteligentes aprendan a producir ordenadores aún más inteligentes. Si las CETs desarrollan computadoras —ya que rutinariamente asumimos que desarrollarán radiotelescopios, debemos asumir que desarrollarán computadoras— entonces la Singularidad también les ocurrirá a ellos. Esta, entonces, es la explicación de Vinge de la paradoja de Fermi: las civilizaciones alienígenas golpean la Singularidad y se convierten en seres superinteligentes, trascendentes e incognoscibles.

Las especulaciones de Vinge sobre la Singularidad son fascinantes. Y como explicación de la paradoja de Fermi, la sugerencia mejora las explicaciones que requieren una uniformidad de motivo o circunstancia. No *todos* las CETs se volarán a sí mismas, o elegirán no participar en vuelos espaciales, o lo que sea. Pero podemos argumentar razonablemente que toda civilización tecnológica desarrollará la computación; y si la computación conduce inevitablemente a una Singularidad, entonces presumiblemente todas las CETs inevitablemente desaparecerán en una Singularidad. Las CETs están ahí, pero de una forma fundamentalmente incomprensible para los mortales no superinteligentes como nosotros. Sin embargo, como explicación de la paradoja, creo que tiene problemas.

En primer lugar, aunque *pueda* existir una alta inteligencia sobre un sustrato no biológico, la Singularidad podría nunca ocurrir.[172] Hay varias razones —económicas, políticas, sociales— por las que podría evitarse una Singularidad. También hay razones tecnológicas por las que la Singularidad podría no ocurrir. Por ejemplo, para el logro de la Singularidad, los avances en software serán al menos tan importantes como los avances en hardware. Sin un software *mucho* más sofisticado que el que poseemos actualmente, la Singularidad simplemente no sucederá. Ahora, si bien es cierto que varias medidas de hardware parecen obedecer la ley de Moore, las mejoras en el software son mucho menos espectaculares. (El procesador de texto que uso es la última versión del programa. Ciertamente tiene más características que la versión que estaba usando hace diez años, pero nunca *uso* esas características. De hecho, el programa es probablemente un poco menos útil para mí que hace diez años; persevero con él porque todo el mundo lo usa y necesito intercambiar documentos con la gente. El programa que estoy usando para componer este libro, que se llama TEX, es una maravillosa pieza de software cuyo creador congeló el desarrollo del programa hace varios años.[173] Mientras que hay algún progreso en la comunidad TEX mundial hacia un programa de composición aún mejor, el progreso es mucho más lento de lo que sería el caso si la ley de Moore estuviera en operación. Por supuesto, el tipo de software necesario para crear la “explosión de inteligencia” no tiene nada que ver con procesadores de texto o programas de composición tipográfica. Pero

el punto es el mismo: los avances en software y en metodologías de software vienen a un ritmo mucho más lento. Simplemente puede que no seamos lo suficientemente inteligentes para generar el software que nos llevará a una Singularidad. Tal vez veamos un futuro en el que máquinas increíblemente poderosas hagan cosas increíbles — pero sin autoconciencia; seguramente esto es al menos tan plausible como un futuro que contiene una Singularidad.

Incluso si una Singularidad es inevitable, no veo cómo explica la paradoja de Fermi. Podemos preguntarnos, como podría hacer Fermi: ¿dónde están las superinteligencias? Los motivos y objetivos de una criatura superinteligente de post-Singularidad pueden ser desconocidos para nosotros — pero también, presumiblemente, lo serían los motivos y objetivos de cualquier civilización K3 "tradicional" que pueda existir. Sin embargo, estamos felices de pensar en cómo detectar tales civilizaciones K3. (De hecho, podemos tener más posibilidades de entender a los seres post-Singularidad en la Tierra que de entender a los extraterrestres, porque en cierto sentido esas entidades *serían* nosotros. Nosotros, en cierto sentido, los habríamos creado y posiblemente imprimido en ellos ciertos valores. Incluso si somos incapaces de entender o comunicarnos con entidades superinteligentes, no se deduce que esas entidades deban desconectarse con el resto del Universo físico. Una superinteligencia debe, como nosotros, obedecer las leyes de la física; y presumiblemente tomaría decisiones económicas racionales. Así que la misma lógica que sugiere que una civilización tecnológica avanzada colonizaría rápidamente la Galaxia nos lleva a concluir que una superinteligencia también colonizaría la Galaxia — excepto que lo haría más rápida y eficientemente que las formas biológicas "normales".

Incluso si eligen no colonizar, incluso si las entidades post-Singularidad trascienden nuestra comprensión de la realidad — se van a otras dimensiones (página 188) o pasan su tiempo creando los universos infantiles que Harrison propuso (página 94), o se involucran en cualquier actividad que impida la exploración de nuestro Universo — habría seres de inteligencia normal no aumentada dejados atrás. En nuestro caso, siento que la mayor parte de la humanidad elegiría no participar en la Singularidad. Pero no significa que nos extinguiríamos. A menos que las superinteligencias sintieran que tenían que destruirnos (¿por qué se molestarían?), podríamos seguir viviendo como siempre lo hemos hecho. Podríamos tener la misma relación con los seres superinteligentes que las bacterias, pero ¿y qué? Hace dos mil millones de años las bacterias eran la forma de vida dominante en la Tierra, y según muchas medidas (longevidad de las especies, biomasa total, capacidad de resistir una catástrofe global, etc.) todavía lo son. La existencia de seres humanos simplemente no afecta a las bacterias. De la misma manera, la existencia de seres superinteligentes no tiene por qué afectar necesariamente a la humanidad; ellos podrían hacer sus cosas extrañas, y nosotros podríamos seguir haciendo las nuestras. Y la existencia de seres superinteligentes no afecta nuestra capacidad de comunicarnos con CETs de ideas afines.

En mi opinión, la existencia de una Singularidad no explica la paradoja de Fermi. ¡Lo exacerba!

SOLUCIÓN 29: LOS CIELOS NUBLADOS SON COMUNES

La larga noche había llegado de nuevo.

Isaac Asimov,
Anochecer

Cada vez que se realizan encuestas de estas cosas, *Anochecer* (*Nightfall*) de Asimov es votada rutinariamente como la pieza más grande de SF por debajo de la longitud de la novela. Cuenta la historia de los científicos en Lagash, un planeta en un sistema de seis estrellas. En realidad, la órbita caótica de Lagash no permitiría el desarrollo de formas de vida avanzadas. Sin embargo, por el bien de la historia, Asimov postula que en el planeta se han desarrollado criaturas inteligentes y técnicamente avanzadas. Los físicos de allí han descubierto recientemente la ley de la gravitación universal, por lo que pueden predecir la posición de cualquiera de los seis soles de Lagash. Su nuevo conocimiento también les permite deducir la existencia de una luna orbitando Lagash. Hay que deducir la presencia de la luna porque no es visible: tener seis soles significa que la oscuridad nunca cae sobre Lagash. El planeta nunca tiene noche. La caída de la noche describe lo que sucede en Lagash cuando una rara alineación de la luna y las seis estrellas produce un eclipse, y los seres de Lagash por primera vez ven el cielo nocturno. Es una historia maravillosa.[174]

A los astrónomos de Lagash les resultaría difícil desarrollar lo que llamamos astronomía. Puesto que la luz de sus seis soles ahoga la luz de cualquier otro cuerpo astronómico, no podían saber de la existencia de planetas o estrellas. Históricamente, en la Tierra, el desarrollo de la ciencia física dependía críticamente de tener planetas cuyas órbitas los científicos trataban de explicar. Sin una visión clara de los cielos, ¿cómo podrían los astrónomos de Lagash desarrollar una comprensión del Universo físico o de su lugar en él? Podrían ser nuestros superiores en términos de inteligencia, podrían desarrollar una tecnología más allá de la nuestra, pero no intentarían contactarnos porque no sabrían o ni siquiera sospecharían de nuestra existencia.

Aunque la situación en *Anochecer* es improbable, uno puede pensar en muchos casos donde el ambiente físico de una CET les impediría desarrollar la noción de que los seres existen en otros mundos. ¿Y si, como preguntó un filósofo, los cielos nublados son comunes? No importa cuán inteligente sea la especie, no importa cuán buena sea su tecnología, esos seres nunca podrían desarrollar una comprensión del Universo más allá de su planeta. La comunicación interestelar no tendría lugar. Tal vez hay miles de CETs ahí fuera — pero están detrás de la cubierta de nubes, o atrapados cerca del centro Galáctico donde el cielo es eternamente brillante, o en cualquiera de los cientos de ambientes que harían la astronomía difícil. ¿Esto explica la

paradoja?

Esta idea ha dado lugar a algunas de las más grandes historias del SF, pero es difícil aceptarla como una explicación de la paradoja de Fermi. Como veremos más adelante, no sabemos cuántos planetas habitables existen — pero sí sabemos que el número es probablemente grande. ¡Es inconcebible que la Tierra sea el *único* ambiente planetario con una vista clara de los cielos!

SOLUCIÓN 30: EXISTEN INFINIDAD DE CETs PERO SÓLO UNA DENTRO DE NUESTRO HORIZONTE DE PARTÍCULAS: NOSOTROS

Todos vivimos bajo el mismo cielo, pero no todos tenemos el mismo horizonte.

Konrad Adenauer

Michael Hart tiene una manera interesante de considerar la paradoja que tanto ha hecho por promover. Para apreciar plenamente su argumento, tenemos que entender la noción de un horizonte de partículas.[175]

Un horizonte de partículas es más fácil de explicar en un Universo estático. (El Universo, por supuesto, no es estático. Comenzó en el Big Bang, se ha estado expandiendo desde entonces, y hallazgos recientes sugieren que se expandirá por toda la eternidad. Tomando en cuenta la expansión del Universo hace que una discusión de los horizontes de las partículas sea bastante sutil. Afortunadamente, nada se pierde si discutimos la idea en términos de un Universo estático. Imaginen, entonces, un Universo que es infinito en extensión y a través del cual las galaxias están distribuidas uniformemente. Además, este Universo modelo nació hace unos 15 mil millones de años; tal vez las galaxias ya existían, y alguna inteligencia suprema "activó el interruptor" y encendió todas las estrellas precisamente en el mismo instante. ¿Cómo sería un Universo así para un observador en un planeta parecido a la Tierra, unos 15 mil millones de años después de este evento de creación? ¿Sería el cielo nocturno cegadoramente brillante, el resultado de la luz que llega al planeta desde el infinito número de galaxias? Sorprendentemente (al menos para aquellos que no están familiarizados con la paradoja de Olbers), este Universo estático infinito se parecería a nuestro propio Universo. El punto a recordar es que nada puede viajar más rápido que la luz. Así que ninguna influencia — ni luz, ni ondas gravitacionales, ni nada — podría haber llegado al observador de regiones más distantes que 15 mil millones de años luz. Esta distancia — la distancia al horizonte de partículas — es el tamaño efectivo del Universo observable. Nada más allá del horizonte ha tenido tiempo de llegar al observador.

Hart plantea el siguiente argumento. Primero, supongamos que nuestro Universo es infinito. Sin embargo, desde que el Universo comenzó hace unos 15 mil millones de años, el tamaño del Universo *observable* viene dado por la distancia al horizonte de partículas. En segundo lugar, supongamos que la *biogénesis* —el desarrollo de la vida a partir de material no viviente— es un hecho extremadamente raro. (Discutiremos el problema de la biogénesis con más detalle más adelante, pero en este punto es suficiente decir que Hart cree que la probabilidad de generar las moléculas características de la vida a través de la mezcla aleatoria de moléculas más simples es excepcionalmente

pequeña. La mayoría de los biólogos piensan que la biogénesis debe ser común, porque la vida surgió tan rápidamente en la Tierra; sin embargo, nuestro conocimiento de estas cosas es tan incompleto que no se puede descartar el argumento de Hart. De ello se deduce que en un Universo infinito habrá necesariamente un número infinito de planetas con vida, pero dentro de un determinado horizonte de partículas podría haber sólo un planeta con vida. Según este argumento, hay un sentido en el que no hay nada particularmente especial en la Tierra: en un Universo infinito habrá un número infinito de otras Tierras rebosantes de vida. Pero dentro de *nuestro* horizonte de partículas — dentro de *nuestro* Universo observable — sólo la Tierra espontáneamente dio origen a la vida.

Como Hart señala, su idea puede ser falsificada fácilmente. Por ejemplo, los extraterrestres podrían visitar la Tierra; o el SETI podría tener éxito y detectar señales; o los astrobiólogos podrían probar que la vida surgió espontáneamente en Marte e independientemente de la Tierra. Cualquiera de estos desarrollos refutaría la noción de que la biogénesis es un evento raro, único en el universo. Sin embargo, en ausencia de estos desarrollos, Hart argumenta que la paradoja de Fermi lleva a una escalofriante conclusión: somos la única civilización dentro de nuestro horizonte de partículas. Aunque el Universo contiene un número infinito de civilizaciones avanzadas, para todos los propósitos prácticos estamos solos.

* * *

La conclusión de que estamos solos en el Universo — la tercera clase de solución a la paradoja de Fermi — es el tema del siguiente capítulo.

5

Ellos no Existen

La clase final de soluciones a la paradoja Fermi es que "ellos" —civilizaciones extraterrestres lo suficientemente avanzadas como para que nos comuniquemos con ellos— no existen.

Dentro de esta clase de soluciones, uno puede discernir diferentes enfoques a la pregunta de Fermi. Sin embargo, en última instancia, estas soluciones dependen de hacer diminutos uno o más de los términos de la ecuación de Drake. Si un solo término es cercano a cero, o si varios de los términos son pequeños, el efecto es el mismo: cuando todos los términos se multiplican juntos, el resultado es N = 1. La única civilización tecnológicamente avanzada en la Galaxia, y quizás en todo el Universo, es la nuestra.

Recientemente, Peter Ward y Don Brownlee, científicos de la Universidad de Washington, escribieron un libro estimulante y sugerente llamado *Rare Earth* (*Tierra Rara*).[176] Presentaron un argumento coherente acerca de por qué la vida compleja puede ser un fenómeno inusual. (Extrañamente, no hacen mención de la paradoja de Fermi.) En este capítulo discutiré varias de las ideas hechas en *Rare Earth*. Puesto que cada una de estas ideas ha sido propuesta individualmente como una resolución a la paradoja de Fermi, las discuto individualmente. Sin embargo, también podrían haberse agrupado como una única solución de "Tierra Rara" a la paradoja.

Es posible que no existan CETs avanzadas debido a la falta de entornos adecuados: Los planetas similares a la Tierra pueden ser raros. Pero tal vez no existen porque la vida misma es un fenómeno raro; tal vez el surgimiento de la vida a partir de material no viviente es una casualidad casi milagrosa, o tal vez es improbable que ocurra la evolución de formas de vida complejas. Discutiré varias soluciones establecidas sobre estas ideas, pero vale la pena tener en cuenta que las discusiones contendrán una limitación importante: Asumiré a lo largo de todo el tiempo que la vida natural está basada en el carbono y requiere agua como solvente. Algunos científicos han argumentado que otros productos químicos, en particular el silicio, podrían utilizarse en lugar del carbono; algunos incluso han argumentado que otros disolventes, como el metano, podrían utilizarse en lugar del agua. Personalmente —y esto puede ser un fallo de imaginación por mi parte— me resulta difícil concebir una bioquímica que no contenga agua o carbono. El agua, en particular, estoy seguro de que es necesaria para la vida. Encuentra agua, y tendrás la oportunidad de encontrar vida. Si usted cree que la vida puede tomar formas muy diferentes —quizás como patrones persistentes en las nubes de plasma, o como torbellinos portadores de información en fluidos viscosos, o lo que

sea— entonces las soluciones que presento aquí parecerán estrechas de miras.[177]

Más adelante podremos descubrir que muchas de las soluciones propuestas en este capítulo provenían de una falta de imaginación científica. Pero estamos en la difícil posición de tratar de generalizar desde una sola instancia — por lo que sabemos, la Tierra es el único planeta con vida. Es peligroso sacar conclusiones de un tamaño de muestra de uno, pero en este caso, ¿qué más podemos hacer? Inevitablemente seremos influenciados —quizás sesgado es una palabra mejor— por aquellos factores que parecen necesarios para nuestra existencia continuada. Estamos obligados por el Principio Antrópico Débil (PAD), que establece que lo que podemos observar debe ser restringido por las condiciones necesarias para nuestra presencia como observadores. Dado que es imposible evitar el PAD en una discusión de la paradoja de Fermi, tiene sentido comenzar esta parte del libro con una solución basada en el razonamiento antrópico. Las soluciones antrópicas son bastante abstractas; las soluciones posteriores se basarán en propuestas más concretas.

SOLUCIÓN 31: EL UNIVERSO ESTÁ AQUÍ PARA NOSOTROS

El hombre es la medida de todas las cosas.
Protágoras

Un argumento notable, que precede al análisis seminal de Hart de la paradoja de Fermi, sugiere que la humanidad probablemente está sola. El argumento se basa en la existencia de una serie de "pasos difíciles" en el camino hacia el desarrollo de una civilización tecnológicamente avanzada. Ejemplos de "pasos potencialmente difíciles" que discutiremos más adelante incluyen la génesis de la vida, la evolución de los animales multicelulares y el desarrollo del lenguaje simbólico. Sin embargo, los detalles precisos de los pasos no son importantes aquí. El argumento simplemente requiere que haya una serie de pasos críticos pero poco probables en el camino hacia la inteligencia. (El eminente biólogo evolutivo Ernst Mayr enumeró una vez más de una docena de estos pasos "difíciles".[178] Otros científicos han sugerido que el número podría ser aún mayor, particularmente si se añaden a la lista ciertas coincidencias físicas y astronómicas). Algunos de los pasos evolutivos que llamamos "difíciles" pueden no ser obstáculos en absoluto. Pensamos que un paso evolutivo en particular es difícil si ocurrió sólo una vez en la historia de la Tierra; pero algunos pasos probablemente podrían darse sólo una vez — la competencia que ellos estimularon habría hecho que un segundo suceso fuera redundante. Por otro lado, algunos pasos pueden haber sido realmente improbables. Por ejemplo, si un paso crítico en particular requería que varias mutaciones que de otra manera no tendrían valor tuvieran lugar al mismo tiempo, entonces tiene sentido considerar el paso como una casualidad.

Consideremos ahora una notable coincidencia, que se encuentra en el centro del argumento que se expone a continuación.

Por un lado, la vida útil de nuestro Sol es de unos 10.000 millones de años. El período durante el cual puede sostener planetas portadores de vida puede ser menor que este — algunos astrónomos creen que la evolución futura del Sol hará que la Tierra se vuelva inhabitable en otros 1 o 2 mil millones de años, por lo que la vida "útil" del Sol podría ser de tan sólo 6 o 7 mil millones de años. Por otro lado, el Homo sapiens llegó a la escena cuando el Sol tenía unos 4.500 millones de años. Estas dos escalas de tiempo —la vida útil del Sol y el tiempo para la aparición de vida inteligente alrededor del Sol— están ciertamente dentro de un factor de 2 entre sí, e incluso podrían estar dentro de un factor de 1,3 entre sí. La casi igualdad de estas escalas de tiempo es realmente increíble. Las dos escalas de tiempo están determinadas por factores que, ya sea individualmente o en combinación, parecen no tener nada que ver el uno con el otro. La vida útil del Sol está determinada por una combinación de factores gravitacionales y nucleares, mientras que una combinación de factores químicos, biológicos y evolutivos determina el

tiempo de aparición de la vida inteligente. Vivimos en un Universo en el que las escalas de tiempo abarcan un amplio rango: muchos procesos subatómicos ocurren en escalas de tiempo tan cortas como 10^{-10} segundos, mientras que muchos procesos astronómicos ocurren en escalas de tiempo tan largas como 10^{15} segundos. Los tiempos típicos de algunos otros procesos son aún más extremos. La probabilidad de que dos escalas de tiempo completamente independientes tengan casi el mismo valor es remota. ¿Cómo explicar esta observación sin recurrir a la coincidencia?

Una solución sería si la escala de tiempo evolutiva fuera mucho más pequeña que 4.500 millones de años. Supongamos que el tiempo típico para la evolución de la vida inteligente en un planeta similar a la Tierra es de sólo un millón de años. La coincidencia de las escalas de tiempo disminuiría, pero a expensas de hacer que la probabilidad de que el reciente surgimiento de la humanidad se esfume. Después de todo, si podríamos haber surgido sólo un millón de años después de que la Tierra se enfriara, entonces ¿por qué no observamos que la Tierra tiene un millón de años? Por lo menos, ¿por qué no observamos que tiene 2 millones de años, o 3, o 4? ¿Por qué tardamos 4.500 millones de años en aparecer? Esta no es una buena solución.

La otra solución requiere que la escala de tiempo evolutiva sea mucho más larga que 4.500 millones de años. Esto concuerda con la sugerencia de Mayr de una serie de pasos difíciles en el desarrollo de la inteligencia — "difíciles" en este sentido, lo que significa que, en un planeta viable dado, el tiempo típico para que ocurra un paso es largo (quizás más largo que la edad actual del Universo). Si hay que dar algunos pasos difíciles, ¡entonces no esperamos estar aquí en absoluto!

La mayoría de las personas, al escuchar esta segunda solución, la descartan por los mismos motivos que la primera: la probabilidad de que la humanidad emerja recientemente es pequeña. Pero las dos situaciones no son equivalentes.

Considera el conjunto de todos los universos posibles. (Ya sea que consideres estos universos como de alguna manera "reales" o como algún tipo de idealización matemática depende de ti. En algunos universos, cosas improbables ocurrirán; una cadena de eventos improbables ocurrirá. En algunos universos, debido al ciego funcionamiento del azar, sucederá el conjunto de pasos difíciles que conducen a la inteligencia. *Y es precisamente un universo así que una especie inteligente observará* — con ellos mismos en él. En otras palabras, podemos ignorar los universos posibles en los que no existimos, ya que por definición no existen para nosotros. Debemos observar aquellos universos en los que los pasos difíciles han ocurrido y nos han conducido. Ahora podemos preguntar: De todos los universos que existen para nosotros, ¿cuándo es más probable que emerjamos, dado que sólo podemos emerger en algún momento de los 10.000 millones de años de vida total del Sol? (O, si es el caso, ¿la vida *útil* del Sol de 6.000 a 7.000 millones de años? Un simple cálculo muestra que si hay 12 pasos difíciles, entonces el

tiempo más probable de emergencia es después de que ha pasado el 94% de la vida útil disponible de la estrella.

Nuestras observaciones parecen ser coherentes con los resultados de este simple cálculo. Si el Sol fuera capaz de mantener la vida en la Tierra durante 10 mil millones de años, entonces la humanidad emergió después de que aproximadamente el 50% del tiempo disponible había transcurrido. Sin embargo, si, como algunos astrónomos creen, el Sol sólo puede mantener la vida durante otros mil millones de años más o menos, entonces la humanidad surgió después de aproximadamente el 83% del tiempo disponible. Esto es impresionantemente cerca de la hora esperada de llegada.

El momento más probable del surgimiento de una civilización en comunicación

Supongamos que hay n pasos difíciles en el camino hacia el desarrollo de una civilización capaz de comunicación interestelar. Y supongamos que estos pasos deben tener lugar a lo largo de la vida V (en años) de una estrella. Un cálculo directo muestra que el tiempo más probable de emergencia de una civilización comunicante está dado por la expresión $V/(2^{1/n})$. Si hay una docena de pasos difíciles, así que $n = 12$, entonces el tiempo más probable de emergencia es $0{,}94V$. El cálculo no determina exactamente cuándo emergerá una especie inteligente; sólo que el tiempo medio de emergencia, si hay 12 pasos difíciles de negociar, es el 94% de la vida de la estrella.

Finalmente, llegamos al punto clave. Por el mero hecho de que hayamos seleccionado los universos en los que existimos (¿y cómo podríamos seleccionar cualquier otro tipo de universo?), no podemos inferir que existan otras especies inteligentes. Tenemos que estar aquí porque nos observamos a nosotros mismos para estar aquí; pero la existencia de extraterrestres debe lidiar con las probabilidades, y las probabilidades no son buenas. Otro cálculo lo deja claro. Si hay una docena de pasos difíciles de negociar en el camino hacia la alta inteligencia, entonces, incluso bajo generosas suposiciones, sólo hay una posibilidad entre un millón de millones de que haya otra especie inteligente en todo nuestro Universo. ¡No es de extrañar que no los observemos!

El Número de Especies Inteligentes en Nuestro Universo

Supongamos que hay n pasos difíciles en el camino a la inteligencia y cada paso requiere típicamente d años para ocurrir. Además, supongamos que hay planetas viables, cada uno de los cuales podría haber soportado vida durante t años. El número de especies inteligentes que existen está dado por la expresión $p \times [t/(n \times d)]^n$. Seamos generosos y supongamos que cada estrella en cada galaxia posee un planeta viable; así que $p \approx 10^{22}$. Seamos aún más

generosos y supongamos que cada planeta ha sido viable durante aproximadamente la edad del Universo, así que $t \approx 10^{10}$ años. Sin embargo, d debe ser largo: eso, después de todo, es lo que hace el paso difícil. Así que supongamos $d \approx 10^{12}$ años — 100 veces la edad del Universo. Finalmente, supongamos como antes que hay una docena de pasos difíciles, así que $n = 12$. Si conectamos estos números a la expresión anterior, encontramos que el número de especies inteligentes es de 10^{-15}.

Este tipo de argumento para la inexistencia de CETs fue presentado por primera vez por Brandon Carter.[179] Es conocido como un argumento *antrópico*. (Hemos conocido ideas antrópicas antes en este libro: el argumento del día del juicio final de la sugerencia de Gott y Hart sobre la improbabilidad de la génesis de la vida tiene connotaciones antrópicas. Conoceremos otros ejemplos.) El uso del término "antrópico" por parte de Carter fue quizás desafortunado, ya que implica que la humanidad es de alguna manera necesaria. Todo lo que se necesita para que el argumento funcione es que los observadores inteligentes —*cualquier* observador inteligente— se auto-seleccionen su Universo. Sin embargo, en este Universo somos *nosotros* los que hacemos las observaciones.

El estado del razonamiento antrópico en la ciencia es polémico. Algunos lo ven como una abdicación de la responsabilidad de los científicos de dar explicaciones. Por ejemplo, la idea de Smolin de que la selección natural actúa sobre universos enteros (ver página 91) es un intento de alejarse del razonamiento antrópico. Sin embargo, muchos científicos respetables han empleado ideas antrópicas en un intento de explicar varias características del Universo que parecen ser "justas" para la evolución de la vida; si ciertas constantes físicas poseyeran sólo valores ligeramente diferentes, entonces no estaríamos aquí. Las estrellas no brillarían, o el Universo habría colapsado sobre sí mismo en una fracción de segundo, o elementos pesados no podrían formarse, y así sucesivamente. El hecho de nuestra existencia puede quizás, de alguna manera, dar sentido a estas observaciones. (Pero creo que también se puede argumentar que estas "explicaciones" son esencialmente triviales.

Existen varios tipos de razonamiento antrópico, que corresponden a varios principios antrópicos, cada uno con diferentes matices de significado. Según Carter, el principio antrópico débil (PAD) es que "lo que podemos esperar observar debe estar restringido por las condiciones necesarias para nuestra presencia como observadores". La PAD parece casi tautológica. El principio antrópico fuerte (PAFu), por otro lado, es más polémico: "el Universo (y por lo tanto los parámetros fundamentales de los que depende) debe ser tal que admita la creación de observadores dentro de él en algún momento". Barrow y Tipler, en un libro clásico, también discuten el principio antrópico final (PAFi), que ellos definen como "el procesamiento inteligente de la información debe llegar a existir en el Universo y, una vez que llegue a existir, nunca se extinguirá".[180] El matemático Martin Gardner, en su manera

inimitable, llama a esta última versión el principio antrópico completamente ridículo (CRAP, por sus siglas en inglés: *completely ridiculous anthropic principle*).

Es interesante que Tipler amplió la noción del PAFi en un libro titulado *The Physics of Immortality* (*La Física de la Inmortalidad*).[181] Consideró el futuro lejano del Universo, y fue llevado a un concepto no muy diferente al Punto Omega de Teilhard de Chardin. Su trabajo mostró que, si el Universo colapsa en un Big Crunch, entonces una inteligencia futura encontraría posible realizar un número infinito de cálculos. Todo ser que haya vivido podría ser "resucitado" como una simulación computacional. Según su interpretación del PAFi, el Universo debe ser tal que permita esta cantidad infinita de procesamiento de información. Ahora, aunque las ideas de Tipler fueron atacadas por ser demasiado especulativas (y demasiado abiertamente religiosas), su hipótesis al menos tenía la virtud de ser falsificable. Hizo una predicción definitiva y comprobable: el Universo está cerrado y colapsará sobre sí mismo. Sin embargo, observaciones recientes parecen indicar que el Universo no sólo está abierto, sino que se está expandiendo *más rápidamente* a medida que envejece. Tipler, al parecer, estaba equivocado; su interpretación del PAFi parece refutada. Quizás algún día descubriremos señales de extraterrestres, o incluso recibiremos una visita de ellos. Tal descubrimiento pondría en duda el PAD y el PAFu. Dejo que el lector decida si tal descubrimiento es probable.

SOLUCIÓN 32: LA VIDA PUEDE HABER SURGIDO RECIENTEMENTE

Para todo hay un tiempo, y un tiempo para cada propósito bajo el cielo.

Eclesiastés 3:1

El astrónomo Mario Livio no está de acuerdo con la idea de que la escala de tiempo para la evolución de la vida inteligente es completamente independiente de la vida de la secuencia principal de una estrella. Si las dos escalas de tiempo estuvieran relacionadas de una manera particular — si la escala de tiempo evolutiva aumenta a medida que aumenta la vida útil de una estrella — entonces *esperaríamos* observar las dos escalas de tiempo como aproximadamente iguales. La sombría conclusión de Carter sobre la inexistencia de CETs no seguiría entonces. Pero ¿cómo puede la vida de una estrella influir en la escala de tiempo de la evolución biológica?[182]

Livio considera un modelo simple de cómo una atmósfera planetaria como la de la Tierra se desarrolla hasta el punto en que puede soportar vida. No se trata de un modelo serio de desarrollo atmosférico; más bien, se pretende demostrar un posible vínculo entre los tiempos de vida estelares y la escala de tiempo para la evolución biológica.

En su modelo, Livio identifica dos fases clave en el desarrollo de una atmósfera que sostiene la vida. La primera implica la liberación de oxígeno de la fotodisociación del vapor de agua. En la Tierra, esta fase duró unos 2.400 millones de años y dio lugar a una atmósfera con niveles de oxígeno en torno al 0,1% de los valores actuales. La duración de esta fase depende de la intensidad de la radiación emitida por la estrella en la región de longitud de onda de 100 a 200 nm, porque sólo esta radiación conduce a la disociación del vapor de agua.

La segunda fase implica un aumento de los niveles de oxígeno y ozono hasta aproximadamente el 10% de sus valores actuales. En la Tierra, esta fase duró alrededor de 1.600 millones de años. Una vez que los niveles de oxígeno y ozono eran lo suficientemente altos, la superficie de la Tierra estaba protegida contra la radiación ultravioleta (UV) en la región de longitud de onda de 200 a 300 nm. Este escudo era importante porque protegía dos ingredientes clave de la vida celular: los ácidos nucleicos y las proteínas. Los ácidos nucleicos absorben la radiación fuertemente en la región de longitud de onda de 260 a 270 nm, mientras que las proteínas absorben la radiación fuertemente en la región de longitud de onda de 270 a 290 nm; la radiación en la región de 200 a 300 nm es por lo tanto letal para la actividad celular. Es vital —al menos para la vida terrestre— que una atmósfera desarrolle una capa protectora para estas longitudes de onda. Y de los posibles candidatos de la atmósfera de un planeta, sólo el ozono absorbe eficientemente en la región

de longitud de onda de 200 a 300 nm: *un planeta necesita una capa de ozono*. Livio argumenta que, al igual que en la Tierra, la escala de tiempo para desarrollar un escudo de ozono contra la radiación UV es aproximadamente equivalente a la escala de tiempo para el desarrollo de la vida.

Diferentes tipos de estrellas emiten diferentes cantidades de energía en la región UV. Las estrellas de alta masa son más calientes que las de baja masa y emiten más radiación UV, pero tienen una vida útil más corta. Por lo tanto, para un determinado tamaño y órbita planetaria, la escala de tiempo para el desarrollo de una capa de ozono depende del tipo de radiación emitida por la estrella, y por lo tanto de la vida útil de la estrella. Después de un cálculo detallado, Livio argumenta que el tiempo necesario para que la vida inteligente emerja aumenta casi como el cuadrado de la vida estelar. Si tal relación se mantiene, entonces es probable que observemos especies inteligentes que emergen en una escala de tiempo comparable a la vida útil de la secuencia principal de una estrella.

El propósito del modelo de Livio, repito, es simplemente mostrar si existe una *posible* relación entre la escala de tiempo para la evolución biológica y las vidas estelares. Incluso con esta condición, uno puede estar en desacuerdo con partes del argumento de Livio. Por ejemplo, su modelo implica una condición necesaria para que la vida en la tierra evolucione (a saber, el desarrollo de una capa de ozono); pero ésta no es una condición *suficiente*. Hay muchos otros pasos en el camino hacia la evolución de la vida inteligente, así que incluso si existe un vínculo entre la vida estelar y la escala de tiempo para la evolución biológica, puede ser un factor menor. Sin embargo, animado por el descubrimiento de un vínculo entre estas escalas de tiempo y la posibilidad, por lo tanto, de que no se descarte la existencia de las CETs, Livio se plantea la siguiente pregunta: en la historia del Universo, ¿cuándo es el momento probable para que surjan las CETs?

Si la vida en la Tierra es típica de la vida en otros lugares, entonces la mayoría de las formas de vida estarán basadas en el carbono. Livio, por lo tanto, sugiere que la aparición de CETs coincidirá con el pico en la producción cósmica de carbono. Y esto es algo que podemos calcular.

Los principales productores de carbono cósmico son las nebulosas planetarias, que se producen al final de la fase gingival roja de las estrellas de masa media. Las nebulosas planetarias vierten sus capas externas en el medio interestelar, y el material es reciclado para formar generaciones posteriores de estrellas y planetas. Puesto que los astrónomos creen que conocen la tasa histórica de formación estelar (era más alta en el pasado que en la actualidad, con un pico hace unos 7.000 millones de años) y conocen los detalles relevantes de la evolución estelar, pueden calcular la tasa a la que se formaron las nebulosas planetarias en el pasado y, por lo tanto, la tasa de producción de carbono cósmico. Según los cálculos de Livio, la tasa de formación de nebulosas planetarias alcanzó su punto máximo hace poco menos de 7 mil millones de años. A partir de esto, él argumenta que podríamos esperar que la

vida basada en el carbono haya comenzado cuando el Universo tenía alrededor de 6 mil millones de años de edad. Puesto que el tiempo requerido para que las CETs avanzadas evolucionen es una fracción significativa de una vida estelar, esperaríamos que las CETs se desarrollaran sólo cuando el Universo tuviera alrededor de 10 mil millones de años de antigüedad. Si este es el caso, entonces las CETs no pueden ser más de 3.000 millones de años más antiguas que nosotros.

FIGURA 44 La nebulosa planetaria NGC7027. Objetos como éste producen gran parte del carbono que observamos en el Universo.

La conclusión de Livio ha sido propuesta por otros como una resolución de la paradoja de Fermi. Sugieren que la vida podría haber surgido sólo relativamente recientemente a escala cósmica. En la actualidad no existen CETs capaces de viajar o comunicarse interestelarmente porque, como nosotros, no han tenido tiempo suficiente para desarrollarse. Tal vez en el futuro la galaxia se entusiasme con el comercio interestelar, los viajes y los chismes. Por ahora, sin embargo, todo es silencio.

Pero incluso si la conclusión de Livio es correcta, y no hay CETs más de 3 mil millones de años antes que nosotros, no veo cómo resuelve la paradoja de Fermi. Una CET que es 3.000 millones de años mayor que nosotros ha tenido tiempo de sobra para colonizar la Galaxia; ha tenido tiempo *de sobra* para anunciar su presencia en el Universo. (En el Año Universal, las CETs podrían haber alcanzado nuestro nivel actual de tecnología alrededor del 1 de octubre; por lo tanto, tienen 3 meses para colonizar la galaxia — un proceso que podemos medir en horas a esta escala. Han tenido tiempo suficiente para llegar aquí.) A menos que se pueda demostrar que la inteligencia sólo está entrando en existencia *ahora*, y por lo tanto la vida en la Tierra está entre las más avanzadas de la Galaxia, los argumentos no abordan realmente la idea central de la paradoja.

SOLUCIÓN 33: LOS SISTEMAS PLANETARIOS SON RAROS

Llegará un momento en que los hombres extenderán sus ojos.
Deberían ver planetas como nuestra Tierra.

Christopher Wren,
Conferencia Inaugural como Profesor de Astronomía, Gresham College

Los argumentos antrópicos son bastante abstractos. Se han formulado muchas más sugerencias tangibles sobre las razones por las que las CET podrían no existir. Por ejemplo, tal vez no haya lugar para que se desarrollen.

Una suposición común es que la vida compleja requiere un planeta —preferiblemente parecido a la Tierra— en el que originarse y evolucionar. Una especie tecnológicamente avanzada puede algún día decidir alejarse de la morada del planeta, por supuesto, pero los antepasados evolutivos de esas especies deben haber comenzado como moradores del planeta. (Algunos escritores de SF han explorado la posibilidad de que la vida evolucione en lugares más exóticos, incluyendo la superficie de una estrella de neutrones y un anillo de gas alrededor de una estrella de neutrones.[183] Aunque estos relatos ficticios son a menudo sorprendentemente plausibles, sigue siendo mucho más fácil imaginar tales posibilidades que demostrar de manera convincente y detallada cómo la vida compleja podría originarse y evolucionar en cualquier otro lugar que no sea en un planeta. Cuando Sagan llegó a su cifra de 1 millón de CETs en la Galaxia, asumió que podría haber hasta 10 planetas por estrella. Pero quizás los sistemas planetarios son raros, y el término f_p en la ecuación de Drake es pequeño. Si f_p fuera lo suficientemente pequeño, esto solo podría explicar la paradoja de Fermi.

* * *

No hace mucho tiempo, los astrónomos aún no estaban seguros de cómo se formaban los planetas. Había dos escenarios en competencia. En el primero, un sistema planetario como el nuestro fue retratado como formándose en un evento catastrófico. En el segundo, se pensaba que los sistemas planetarios se condensaban a partir de las nebulosas.[184]

La hipótesis nebular se siente como la explicación más "natural", pero parece poseer un defecto fatal. Si el Sol, por ejemplo, se formó por el colapso de una nube rotativa de polvo y gas, entonces los cálculos muestran que ahora debería girar *extremadamente* rápido. El Sol debería contener la mayor parte del momento angular del Sistema Solar. Y sin embargo, no es así. De hecho, el Sol rota de manera bastante sedentaria — sus regiones ecuatoriales rotan una vez cada 24 días, mientras que sus regiones polares rotan una vez cada 30 días. Esta observación llevó a muchos astrónomos a preferir modelos de

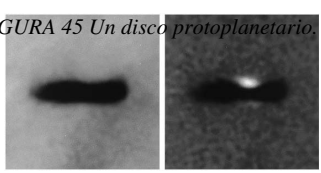
formación planetaria basados en eventos catastróficos. El modelo más popular tenía una estrella casi colisionando con el Sol; los efectos de la marea sacaron un filamento gaseoso del Sol, y el filamento más tarde se rompió y condensó para formar los planetas.[185]

Si los planetas realmente se formaran en colisiones estelares, entonces las perspectivas de encontrar CETs serían sombrías. La densidad de estrellas en el espacio es bastante baja, por lo que las colisiones serían infrecuentes; una estimación temprana puso el número de sistemas planetarios formados de esta manera en ¡sólo diez por galaxia! En una conferencia en 1923, James Jeans dijo: "La astronomía no sabe si la vida es importante en el esquema de las cosas, pero empieza a susurrar que la vida debe ser necesariamente algo rara." Jeans claramente pensó que conocía la resolución de la paradoja, y la paradoja aún no había sido formulada.

Sin embargo, la hipótesis nebular nunca desapareció. Las teorías de la formación planetaria basadas en las colisiones también poseían problemas. La teoría de la colisión no podía explicar muchas de las propiedades observadas de nuestro Sistema Solar. Además, la mayor dificultad con la hipótesis nebular —es decir, explicar cómo la mayor parte del momento angular del Sistema Solar reside en los planetas— fue finalmente resuelta. Sucede que el joven Sol *giró* a alta velocidad, pero la rotación generó un fuerte campo magnético. Líneas magnéticas de fuerza salieron a la nebulosa solar, como rayos de un cubo, y arrastraron el gas con él. Este efecto de "frenado magnético" ralentizó al Sol y transfirió el momento angular al disco gaseoso. Los astrónomos observan evidencia directa de esto: las estrellas jóvenes giran hasta 100 veces más rápido que nuestro Sol, mientras que las estrellas viejas giran más sedadas. Pocos astrónomos dudan ahora de que los planetas en nuestro Sistema Solar se formaron cuando pequeños planetesimales se condensaron a partir de una nube de polvo y gas en forma de disco; en suaves colisiones, estos planetesimales se pegaron y gradualmente formaron los planetas que vemos hoy en día. Si esta teoría es correcta, entonces el mismo proceso debería ocurrir alrededor de otras estrellas. Los planetas deberían ser comunes, como creía Sagan.

Los astrónomos han fotografiado incluso discos protoplanetarios, lo que ha dado crédito a su teoría de la formación planetaria. Pero una cosa es fotografiar un disco de gas que un día *puede* convertirse en un sistema planetario; otra muy distinta es fotografiar un planeta.

FIGURA 45 Un disco protoplanetario.



No es factible, al menos en la actualidad, ver planetas alrededor de estrellas distantes. Los planetas brillan sólo con luz reflejada, por lo que fotografiar un planeta extrasolar es como intentar observar la luz de una

luciérnaga junto a una explosión termonuclear. Sin embargo, los recientes avances en la astronomía observacional han permitido inferir la existencia de planetas alrededor de otras estrellas por la atracción gravitatoria que ejercen sobre sus estrellas matrices. La atracción gravitacional de un gran planeta en una estrella hace que el camino de la estrella "se tambalee". Al medir el bamboleo, los astrónomos no sólo pueden determinar la masa del planeta sino también su distancia de la estrella. El primer planeta detectado por esta técnica sólo se encontró a mediados de la década de 1990; pero la técnica es tan exitosa que ya hay más de 60 planetas extrasolares conocidos (el número exacto depende de cómo se elija definir un planeta), y se están encontrando más cada mes.[186]

Claramente, entonces, es simplemente erróneo intentar explicar la paradoja de Fermi afirmando que el número de estrellas con sistemas planetarios — y por lo tanto el número total de planetas — es pequeño. Ahora sabemos de demasiados sistemas planetarios como para aceptar este argumento.

Sin embargo, hasta ahora los astrónomos sólo han encontrado planetas gigantes — planetas con una masa similar a la de Júpiter. Esto no es sorprendente: usando la técnica descrita anteriormente, los astrónomos sólo pueden encontrar planetas gigantes. Pero de las estrellas probadas hasta la fecha, menos del 10% de ellas tienen planetas detectables. Esto podría deberse a que los planetas detectables del tamaño de Júpiter son relativamente raros — pero podría significar que los planetas en general son bastante raros; ciertamente, no todas las estrellas tienen un sistema planetario. Además, como discutiremos en secciones posteriores, los planetas del tamaño de Júpiter encontrados hasta la fecha tienden a estar extremadamente cerca de su sol o, si orbitan a mayores distancias, tienen órbitas extremadamente elípticas. En cualquier caso, hay pocas posibilidades de que exista en estos sistemas un planeta habitable similar a la Tierra. Un "Júpiter" cerca de su estrella destruirá los planetas rocosos similares a la Tierra, mientras que un "Júpiter" en una órbita elíptica interrumpirá las órbitas de los planetas más pequeños, ya sea lanzándolos al espacio o lanzándolos a la estrella central.

Personalmente, creo que el término f_p en la ecuación de Drake resultará ser más pequeño de lo que creían los primeros optimistas, pero por sí solo seguirá siendo demasiado alto para permitir una resolución de la paradoja de Fermi. Afortunadamente, esto pronto dejará de ser una cuestión de creencia; los rápidos avances en astronomía observacional significan que dentro de unos pocos años tendremos una clara comprensión del número y tipo de sistemas planetarios extrasolares.

SOLUCIÓN 34: SOMOS LOS PRIMEROS

No es el sello del rey lo que puede hacer que el metal sea mejor o más pesado.

William Wycherly,
El traficante de drogas

La bioquímica de los organismos terrestres —y la bioquímica de cualquier organismo extraterrestre que podamos imaginar plausiblemente— depende crucialmente de seis elementos: azufre (S), fósforo (P), oxígeno (O), nitrógeno (N), carbono (C) e hidrógeno (H). Para un astrónomo, cualquier elemento más pesado que el hidrógeno y el helio se conoce como metales. (La *metalicidad* de una estrella, entonces, se refiere a la cantidad de elementos más pesados que posee.) Así que en el lenguaje astronómico, la vida depende de los cinco "metales" SPONC. Poco después del Big Bang, el Universo contenía esencialmente sólo hidrógeno y helio (en la proporción 75% a 25%). El Big Bang habría producido pequeñas cantidades de litio, e incluso trazas más pequeñas de berilio y boro. Pero eso era todo: ninguno de los metales requeridos por la vida estaban allí al principio. Uno de los hallazgos clave de la astronomía moderna es que los elementos más pesados como el SPONC fueron cocinados en reacciones nucleares dentro de las estrellas, y se convirtieron en parte del medio interestelar sólo cuando las estrellas alcanzaron el final de su vida productora de energía. Con el paso del tiempo, la concentración de metales en el Universo aumenta lentamente.

Una resolución de la paradoja — a menudo propuesta y similar en espíritu a la sugerencia de Livio — es que los elementos más pesados sólo recientemente se concentraron lo suficiente en el medio interestelar para permitir que la vida se formara. Se sugiere que los planetas alrededor de estrellas más antiguas carecen de los metales SPONC. Sólo alrededor de estrellas bastante jóvenes —estrellas como el Sol— puede surgir la vida. Así que la humanidad estaría inevitablemente entre las primeras civilizaciones, quizás *la* primera, en surgir.

* * *

Como muchas de las soluciones propuestas que hemos discutido, la sugerencia de que el enriquecimiento químico de la Galaxia resuelve la paradoja de Fermi por *sí misma* es demasiado fuerte. Puede ser un *factor* en la explicación final, pero por dos razones es poco probable que se presente por sí sola como una resolución.

Primero, no sabemos qué metalicidad se requiere de una estrella para poseer planetas viables. ¿Sería suficiente una abundancia de elementos pesados un tercio de la del Sol? ¿Una moneda de 25 centavos? ¿Una décima

parte? Simplemente no lo sabemos. Hasta ahora, no se han encontrado planetas alrededor de ninguna estrella que tenga una metalicidad inferior al 40% de la del Sol, pero estas observaciones están en su infancia. Si la vida puede desarrollarse en planetas que poseen una abundancia mucho menor de elementos pesados, entonces las estrellas muy antiguas podrían ser el hogar de la vida.

Segundo, la metalicidad de las estrellas difiere entre las cuatro *poblaciones estelares*. Algunos tipos de estrellas podrían ser antiguas y, sin embargo, ricas en metales. Las cuatro poblaciones estelares consisten en las estrellas de disco delgado, las estrellas de disco grueso, las estrellas de halo y las estrellas de protuberancia. Las estrellas de halo, que forman un sistema esférico alrededor del centro de la galaxia, son estrellas antiguas. Típicamente tienen una metalicidad cercana al 1% de la del Sol. Es poco probable que esas estrellas posean planetas. El bulto en el centro de la galaxia es antiguo, y sin embargo algunas de las estrellas son muy ricas en metales. Sin embargo, las estrellas de protuberancia orbitan a unos pocos miles de años luz del centro Galáctico, que es un ambiente violentamente energético. Es discutible si pueden existir formas de vida complejas en un entorno de este tipo, y una metalicidad demasiado alta puede ser en sí misma un problema, por lo que lo más seguro es ignorar las estrellas abultadas en estas discusiones. El disco grueso consiste en estrellas que permanecen razonablemente cerca del plano de la galaxia. (Pero no *demasiado* cerca; las estrellas pueden moverse unos pocos miles de años luz por encima o por debajo del plano — de ahí el término disco "grueso". Tales estrellas son viejas, y su metalicidad es generalmente 25% la del Sol. Finalmente, las estrellas de disco delgado, que permanecen a menos de 1000 años luz del plano de la galaxia, son las interesantes desde nuestro punto de vista. El Sol no sólo es un miembro de la población de discos delgados, sino que también lo es el 96% de sus vecinos. Estas estrellas tienen una variedad de edades, desde objetos que tienen 10 mil millones de años hasta estrellas que se han formado recientemente. De manera similar, las metalicidades de las estrellas de disco delgado varían: algunas tienen menos del 1% de la metalicidad del Sol y son malas candidatas para la vida, pero otras tienen *tres veces* la metalicidad del Sol. Así que la situación es más complicada de lo que parece a primera vista. Parece, sin embargo, que dentro de toda esta variabilidad hay muchas estrellas mucho más antiguas que el Sol pero con la misma abundancia de elementos pesados.

Consideremos, por ejemplo, 47 Ursae Majoris — una estrella de disco delgado sólo ligeramente más masiva y sólo ligeramente más caliente que nuestro Sol. Por coincidencia, el día que escribo esta sección los astrónomos han anunciado el descubrimiento de un segundo planeta del tamaño de Júpiter orbitando la estrella.[187] El descubrimiento de 47 UMaj c (como se le llama tentativamente al planeta, y presumiblemente continuará siendo llamado hasta que los astrónomos puedan decidir sobre una mejor nomenclatura para los planetas extrasolares) es interesante por dos razones. Primero, 47 UMaj c está

orbitando en una órbita casi circular alrededor de la estrella, al igual que su compañero 47 UMaj b. Este sistema planetario es el primero que podría resultar como el nuestro, en el sentido de que las órbitas planetarias tienen bajas excentricidades y los planetas de tamaño Júpiter están a una distancia respetable de la estrella. (Así que argumentar que la escasez de "buenos Júpiteres" resuelve la paradoja de Fermi, como lo hacemos en la Solución 37, puede resultar equivocado. Segundo, 47 Ursae Majoris es 2.500 millones de años más vieja que el Sol y sin embargo tiene esencialmente la misma composición química. Así, cualquier planeta similar a la Tierra que orbita esta estrella podría, en principio, haber dado a luz a la vida hace unos 2.500 millones de años; una CET en ese planeta podría estar por delante de nosotros por 2.500 millones de años. Esto corresponde a casi 2,5 meses en el Año Universal — mucho más que el tiempo de colonización de la galaxia.

(Debe destacarse que los astrónomos no saben si existen planetas pequeños y rocosos en el sistema planetario interno de 47 Ursae Majoris. Nuestras técnicas actuales simplemente no pueden detectar tales objetos. Sin embargo, este sistema planetario es sin duda el más parecido al nuestro. La proporción de las masas de 47 UMaj b a 47 UMaj c es de 3,3 a 1, que es igual a la proporción de masas de Júpiter y Saturno. La proporción de sus distancias promedio de 47 Ursae Majoris es igual a la proporción de las distancias promedio de Júpiter y Saturno del Sol. Finalmente, puesto que las observaciones sugieren que no puede haber más planetas gigantes orbitando más cerca de la estrella que 47 UMaj b, parecería haber "espacio" para que existan planetas similares a la Tierra. Desafortunadamente, las simulaciones numéricas sugieren que probablemente no hay Tierras allí: 47 UMaj b y 47 UMaj c orbitan más cerca de su estrella madre que Júpiter y Saturno orbitan el Sol, por lo que su influencia gravitatoria interrumpiría la formación de planetas terrestres a la distancia correcta de la estrella. Pero uno puede soñar.)

Independientemente de si 47 Ursae Majoris resulta poseer planetas terrestres, el hecho es que es una estrella similar al Sol, posee las mismas abundancias químicas que el Sol, y tiene planetas. La estrella es una vecina, a menos de 50 años luz de nosotros. Sin embargo, es 2.500 millones de años mayor que el Sol. Si tales estrellas están en nuestro patio trasero, debe haber muchas de ellas en la galaxia. Tal vez el número de estrellas que son adecuadas para albergar planetas portadores de vida es mucho menor de lo que se pensaba, pero la sugerencia de que el Sol está entre la primera generación de estrellas que pueden dar origen a la vida parece ser insostenible.

Sin embargo, hay otra observación que hacer. Aunque nuestra Galaxia puede poseer millones de estrellas antiguas con suficientes metales para sustentar la vida, lo mismo no es necesariamente cierto para todas las galaxias. Las galaxias elípticas, por ejemplo, generalmente contienen estrellas pobres en metal, y no son el mejor lugar para buscar vida. También es improbable que las pequeñas galaxias irregulares sean el hogar de la vida tal

como la conocemos. Además, los cúmulos globulares (colecciones de millones de estrellas que orbitan galaxias más grandes) son también regiones pobres en metales. Aunque la primera transmisión de radio interestelar dedicada de la Tierra fue al cúmulo globular M13 (ver página 172), es poco probable que la señal atraviese allí un planeta similar a la Tierra. El enriquecimiento químico de las galaxias puede ayudar a explicar por qué no vemos las civilizaciones K3: puede haber muchas menos galaxias que sean aptas para la vida de lo que esperamos al principio.

SOLUCIÓN 35: LOS PLANETAS ROCOSOS SON RAROS

Aquí hay metal más atractivo.
William Shakespeare,
Hamlet, Acto 3, Escena 2

Hasta donde sabemos, los únicos testigos sobrevivientes del nacimiento del Sistema Solar son un grupo de meteoritos ricos en metales llamados *condritas*. (Su nombre proviene de la palabra griega *chondros*, que significa "grano" o "semilla": se refiere a la aparición de las muchas pequeñas inclusiones esféricas, conocidas como *condrulas*, que ocurren dentro de ellas. Las condrulas son típicamente de 1 a 2 mm de diámetro, y están compuestas principalmente de los minerales de silicato olivino y piroxeno. Usando las tasas de descomposición conocidas de varios radioisótopos encontrados en las condritas, podemos calcular cuándo se formaron estos meteoritos. Las mejores estimaciones implican que las condritas se formaron hace unos 4.560 millones de años, que es la edad aceptada del Sistema Solar. Las condritas, al parecer, se formaron en los primeros millones de años de la historia del Sistema Solar.[188]

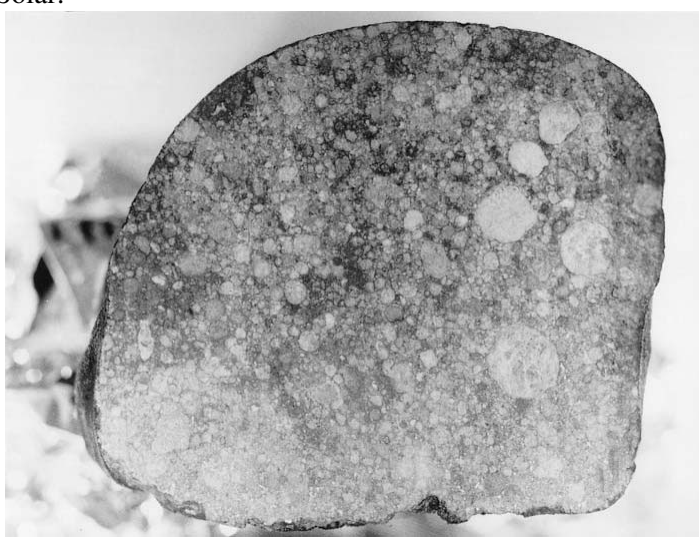


FIGURA 46 Las condrulas son inclusiones esféricas de silicato en las condritas. Sus orígenes siguen siendo objeto de debate. Las condrulas son claramente visibles en esta superficie de corte de la condrita AH77278. Este espécimen mide 8 cm de ancho.

Las condritas ocasionalmente caen a la Tierra, y cuando lo hacen son estudiadas intensivamente. De hecho, las condritas han sido estudiadas por más de dos siglos, y se sabe mucho sobre su composición química y física. Sin embargo, una cosa sigue siendo misteriosa: la naturaleza precisa de las condrulas.[189]

Se han presentado un número vergonzoso de hipótesis para explicar el

enigma de la formación de condrulas. (Un exceso de hipótesis es una señal segura de que no entendemos algo. En el caso de la formación de condrulas, esta falta de comprensión no es sorprendente. Las condrículas no sólo se formaron hace mucho, mucho tiempo, sino que no aparecen en ningún otro tipo de roca. Los geólogos no tienen otros especímenes con los que compararlos. Las ideas van desde la sugerencia de que las condrulas son gotas de lava expulsadas de volcanes extraterrestres hasta la sugerencia de que se forman cuando un rayo descarga a través de bolas de polvo. Todo lo que sabemos con seguridad es que las condrulas deben haber sido calentados a temperaturas superiores a 1800 K, y luego enfriados rápidamente. Una interpretación es que, hace unos 4.500 millones de años, un breve destello de calor se propagó a través del Sistema Solar.

En 1999, los astrónomos irlandeses Brian McBreen y Lorraine Hanlon propusieron una nueva teoría de la formación de condrulas: sugirieron que un estallido de rayos gamma (ERG) podría haber estado involucrado.[190] Supongamos que un ERG ocurrió a 300 años luz del naciente Sistema Solar. Habría bombeado suficiente energía al anillo protoplanetario de polvo y gas para fusionar hasta 6×10^{26} kg de material (100 veces la masa de la Tierra) en gotas ricas en hierro, que rápidamente se enfriarían para formar condrículas. Las condrulas entonces absorberían los rayos gamma y los rayos X del ERG.

Si McBreen y Hanlon están en lo cierto, entonces el Sistema Solar podría ser una rareza en poseer condrulas. Ellos estiman que, en promedio, sólo 1 estrella en 1000 estaría lo suficientemente cerca del estallido como para que ocurra la formación de condrulas. La importancia es que las condrulas de alta densidad pueden haberse asentado rápidamente en el plano del disco protoplanetario y haber ayudado a la formación de los planetas. En otras palabras, los sistemas planetarios como el nuestro —con planetas terrestres rocosos— serían escasos. Y, con sólo un pequeño número de planetas similares a la Tierra en los cuales desarrollarse, las CETs podrían ser raras.

La idea de que la formación de condrulas fue iniciada por un ERG es interesante. Sin embargo, otras sugerencias parecen ofrecer mecanismos más plausibles para hacer condrulas. Además, estos otros mecanismos no implican que haya algo particularmente especial en nuestro Sistema Solar. Por lo tanto, como solución a la paradoja de Fermi, esta no es una de las más importantes de la lista de contendientes.

* * *

Una discusión sobre meteoritos ricos en metales trae a la mente una solución relacionada con la paradoja de Fermi que sale a la superficie de vez en cuando: quizás los planetas con depósitos de minerales metálicos son raros. El razonamiento es simple: si las inteligencias alienígenas no pueden encontrar y trabajar el metal, entonces serán incapaces de desarrollar tecnología — y por lo tanto serán incapaces de construir los radiotelescopios o naves estelares que les permitan contactarnos.

Esta solución ha sido bien examinada por varios autores de SF. Un grupo de autores ha desestimado la sugerencia en historias que invitan a la reflexión. Incluso si la composición de la superficie de la Tierra es inusual entre los planetas (ver la página 280 por una de las razones por las que esto podría ser el caso), ellos creen que esto no significa necesariamente que la tecnología es imposible. La tecnología sería inevitablemente diferente de la nuestra, pero los resultados podrían ser los mismos. (Por ejemplo, ¿quizás los extraterrestres producen electricidad usando medios biológicos en lugar de generadores? Un grupo diferente de autores — ya sea menos imaginativos o más realistas, dependiendo del punto de vista de cada uno — argumentan que la tecnología no puede desarrollarse sin los materiales que damos por sentado.

Volveremos sobre la cuestión del progreso tecnológico en una sección posterior. Sin embargo, sea o no posible la tecnología en ausencia de metales (y esto es algo que tal vez nunca sepamos), parece perverso intentar resolver la paradoja de Fermi suponiendo que la Tierra es el *único* planeta en la Galaxia con depósitos viables de minerales metálicos. La escasez de tales planetas puede ser otro factor que actúe en contra de la existencia de CETs, pero seguramente esto no puede por sí mismo explicar el silencio del Universo.

SOLUCIÓN 36: LAS ZONAS CONTINUAMENTE HABITABLES SON ESTRECHAS

Dame más amor o más desdén; la zona tórrida o la helada.

Thomas Carew

La Mediocridad en el Amor Rechazado

Incluso si los planetas terrestres se forman fácilmente alrededor de las estrellas, otra condición debe cumplirse antes de que la vida, tal como la conocemos, pueda sobrevivir durante los miles de millones de años necesarios para que se desarrolle una civilización tecnológica. Un planeta terrestre tiene que estar en la *zona habitable* (ZH) de un sistema antes de que la vida pueda evolucionar.[191]

La clave de la vida es el agua. En esencia, la zona habitable alrededor de una estrella es la región en la que un planeta como la Tierra podría soportar agua líquida. La ubicación del borde interior de la ZH está determinada por el punto en el que un planeta pierde agua debido a las altas temperaturas cercanas a una estrella. El borde exterior de la ZH está fijado por el punto en el que se congela el agua.[192] Muchos científicos creen que la ZH de nuestro Sistema Solar se extiende desde 0,95 UA hasta 1,37 UA. Venus, con una distancia media de 0,723 UA del Sol, se encuentra dentro del borde interior de la zona habitable; Marte, con una distancia media de 1,524 UA del Sol, se encuentra fuera del borde exterior de la zona habitable. Sólo la Tierra está en el lugar correcto. Sin embargo, la zona habitable es bastante amplia: si la ZH fuera la historia completa, uno esperaría que la mayoría de los otros sistemas tuvieran planetas en la zona. Por supuesto, no es la historia completa.

Michael Hart argumentó que la zona habitable alrededor de una estrella varía con el tiempo. Las estrellas de la secuencia principal se vuelven más brillantes y calientes a medida que envejecen, así que la ZH se mueve hacia afuera a medida que una estrella envejece. Lo que es importante, según Hart, es la zona *continuamente* habitable (ZCH).

Típicamente, la ZCH se define como la región en la que un planeta similar a la Tierra puede soportar agua líquida durante 1.000 millones de años — la escala de tiempo de la evolución presumiblemente requerida para desarrollar vida compleja. En el caso del Sistema Solar, la ZCH existe desde hace 4.500 millones de años, y la Tierra ha tenido la suerte de estar precisamente en el centro de la zona. Claramente, sin embargo, la ZCH debe ser más estrecho que la ZH. En 1979, Hart publicó los resultados de modelos computarizados que parecían mostrar que la ZCH es extremadamente estrecha.[193] Es más ancha alrededor de las estrellas de la secuencia principal G0 (el Sol es una estrella G2) y se reduce a cero en las estrellas K1 frías y las estrellas F7 calientes. En todos los casos, sin embargo, la ZCH era inferior a 0,1 UA. Para el Sistema Solar, por ejemplo, calculó un borde interior de la ZCH a 0,95 UA

y un borde exterior a 1,01 UA. Con una ZCH tan estrecha, uno esperaría que los planetas similares a la Tierra — aquellos que pueden soportar vida durante miles de millones de años — sean mucho más raros de lo que comúnmente se supone.

Aunque el hallazgo de Hart no *probó* que las CETs no pudieran existir, claramente tuvo una relación con la paradoja de Fermi. Si el número de planetas potencialmente portadores de vida es mucho menor de lo que suponen la mayoría de las estimaciones, entonces el número de CET potenciales que existen también debe ser menor. Dependiendo de los valores de los otros factores en la ecuación de Drake, el número total de civilizaciones comunicantes podría reducirse a una: nosotros.

Los cálculos recientes, sin embargo, emplean modelos más sofisticados de la atmósfera primitiva de la Tierra; también tienen en cuenta el reciclaje de CO_2 por la tectónica de placas, un fenómeno desconocido para Hart. Los resultados son alentadores para aquellos que creerían en la existencia de CETs (o al menos en la existencia de hogares planetarios para CETs). Los modelos desarrollados por James Kasting y sus colaboradores sugieren que la ZCH de 4.600 millones de años para nuestro Sistema Solar se extiende de 0,95 UA a 1,15 UA — más grande que el rango calculado por Hart.[194] Otros científicos creen que la ZCH del Sistema Solar puede ser aún más amplia. La ZCH alrededor de otras estrellas, también, es más ancha de lo que se pensaba.

Entonces: ¿qué tan probable es que un sistema planetario dado tenga un planeta que se encuentre dentro de la ZCH? La respuesta depende tanto del tipo de estrella como de la distribución de los planetas en el sistema. Si los planetas se distribuyen tal como están en nuestro Sistema Solar — en otras palabras, si las distancias de los planetas desde la estrella central siguen la ley de Titius-Bode — entonces existirá aproximadamente el mismo número de planetas en las zonas instantáneamente habitables de todos los tipos estelares. Sin embargo, los planetas alrededor de estrellas calientes de tipo 0, B y A no permanecerán por mucho tiempo en una zona habitable, ya que las estrellas mismas evolucionan en luminosidad demasiado rápido. Es improbable que los planetas alrededor de estrellas frías de tipo K y M sean habitables continuamente: la ZH en estos sistemas se encuentra cerca de la estrella central, y por lo tanto el planeta se bloqueará por mareas (cuando un planeta se cierra por mareas, un lado del planeta siempre se enfrenta al calor de la estrella, mientras que el otro lado siempre se enfrenta al frío del espacio abierto). Esta situación es presumiblemente hostil a la vida. Alrededor de estrellas no muy diferentes del Sol, sin embargo, un sistema planetario, si obedece la ley Titius-Bode, tiene aproximadamente una probabilidad de 50:50 de contener un planeta en la ZCH.

Si nuestros modelos actuales de formación planetaria, evolución estelar y evolución atmosférica planetaria a largo plazo son correctos (y debe admitirse que hay lugares donde los científicos seguramente no están seguros de los detalles), entonces la conclusión parece ser que hay potencialmente millones

de planetas continuamente habitables en la Galaxia. Una advertencia, sin embargo. Vimos en una sección anterior que sólo ciertos tipos de estrellas tienen suficiente metalicidad para poseer planetas terrestres; y sólo ciertas partes de la Galaxia están suficientemente protegidas de la violencia de las regiones centrales. Podemos necesitar definir una zona galáctica habitable (ZGH) — que es un anillo que contiene quizás sólo el 20% de las estrellas en la Galaxia. Para que la vida compleja evolucione, una ZCH debe estar dentro de la ZGH — y esto reduce las posibilidades.[195]

SOLUCIÓN 37: LOS JÚPITER SON RAROS

¿Qué hombres son los poetas que pueden hablar de Júpiter si fuera como un hombre, pero si es una inmensa esfera giratoria de metano y amoníaco debe estar en silencio?

Richard Philips Feynman,
Conferencias de Feynman sobre Física

Desde el primer descubrimiento en 1995 de planetas extrasolares, o *exoplanetas*, los astrónomos han encontrado más de 60 planetas más allá de nuestro Sistema Solar. Muchos de estos son objetos del tamaño de Júpiter orbitando en órbitas casi circulares cerca de la estrella madre. (Consideremos el planeta que orbita Rho CrB, por ejemplo. De todos los exoplanetas aún descubiertos, es el más cercano en masa a Júpiter, siendo sólo un 1% menos masivo que Júpiter. Sin embargo, mientras que Júpiter orbita el Sol alrededor de 5,2 UA (una unidad astronómica es la distancia Tierra-Sol, que es una medida de distancia conveniente para los sistemas planetarios), el planeta masivo alrededor de Rho CrB tiene una órbita casi circular a sólo 0,224 UA. Esto significa que está mucho más cerca de su estrella que Mercurio de nuestro Sol; Mercurio orbita a 0,387 UA. No es de extrañar que los planetas masivos que orbitan cerca de una estrella tengan órbitas circulares: las fuerzas de marea de la interacción gravitacional con la estrella harán que la órbita se vuelva circular incluso si la órbita comenzó como una elipse. Tampoco es sorprendente que los astrónomos puedan detectar grandes planetas orbitando cerca de una estrella: nuestras técnicas actuales para detectar planetas funcionan mejor precisamente en tales objetos. La sorpresa es que tantos planetas del tamaño de Júpiter existen en órbitas tan cercanas a una estrella. ¡Estos planetas no deberían existir en absoluto!

Nuestras teorías de formación planetaria implican que los planetas gaseosos como Júpiter no pueden formarse dentro de 3 UA de una estrella como nuestro Sol. Este límite se denomina *línea de nieve*. Entonces, ¿qué están haciendo estos llamados "Júpiter calientes" hasta ahora dentro de la línea de nieve? Con un poco de trabajo detectivesco podemos descartar una posibilidad, a saber, que en realidad no se trata de gigantes gaseosos. Los movimientos Doppler que permiten a los astrónomos inferir la existencia de los planetas también nos dan suficiente información para deducir sus masas; y en algunos casos, las mediciones de la estrella madre durante los tránsitos nos permiten estimar los diámetros de los planetas. Estas dos informaciones nos dan directamente las densidades de los planetas — y ciertamente son gigantes gaseosos. Una segunda posibilidad —es decir, que nuestros modelos de formación planetaria están equivocados— no puede ser descartada. Sin embargo, hay mucha evidencia para apoyar los modelos, y no hay nada que los reemplace; así que los astrónomos son reacios a aceptar esta posibilidad. Lo que deja una tercera posibilidad: los planetas se formaron fuera de la línea

de nieve y más tarde migraron a sus posiciones actuales cerca de sus estrellas madres.

La decadencia orbital de los planetas tipo Júpiter no puede ocurrir una vez que se establece un sistema planetario, así que no necesitamos preocuparnos por una amenaza Joviana en nuestro propio Sistema Solar. Pero el deterioro puede ocurrir al principio del desarrollo de un sistema planetario. Si un gigante gaseoso migra desde fuera de la línea de nieve a una órbita cercana a la estrella, entonces el panorama para cualquier planeta terrestre interno es sombrío. Las simulaciones muestran que los planetas más pequeños son forzados a entrar en la estrella, o expulsados del sistema planetario por completo. Es poco probable que las estrellas con "Júpiter caliente" posean planetas viables.

No todos los exoplanetas son Júpiter calientes. Algunos de ellos están fuera de la línea de nieve, donde esperábamos que estuvieran. Un ejemplo es el planeta alrededor de Epsilon Eridani. (Esta es una de las estrellas parecidas al Sol más cercanas, y una que Frank Drake observó cuando llevó a cabo la primera búsqueda de señales extraterrestres. El planeta, designado Epsilon Eridani b, orbita a 3,36 UA y es 0,88 veces más masivo que Júpiter. El problema con objetos como estos es su gran excentricidad orbital. Por ejemplo, la excentricidad de Epsilon Eridani b es 0,6 (comparado con 0,048 para Júpiter). En otras palabras, nuestro Júpiter tiene una órbita casi circular, mientras que Epsilon Eridani b orbita en una elipse. De hecho, la excentricidad media de los exoplanetas descubiertos hasta la fecha es de 0,28 (con excentricidades que van desde 0, para los Júpiter calientes en órbitas perfectamente circulares, hasta 0,93, para un planeta alrededor de la estrella HD80606). Compare esto con la excentricidad promedio de los planetas en el Sistema Solar: 0,08 (o 0,06 si descontamos a Plutón). Nuestro Júpiter tiene una órbita estable, casi circular — y permite a la Tierra tener una órbita estable, casi circular también. Si Júpiter estuviera en una órbita altamente excéntrica, que parece la norma para un objeto de gran masa orbitando más de 0,2 UA desde su estrella, entonces la Tierra podría no existir.

Así que si nuestro Sistema Solar hubiera contenido un "Júpiter caliente" o un "Júpiter excéntrico", las posibilidades de que la Tierra no hubiera podido sostener vida durante casi 4 mil millones de años son altas. La órbita de la Tierra habría sido alterada catastróficamente. Vale la pena subrayar, una vez más, que nuestras observaciones están significativamente sesgadas. Las técnicas Doppler que usamos para descubrir otros sistemas planetarios son más efectivas para encontrar (i) planetas de grandes masas orbitando muy cerca de la estrella madre y (ii) planetas de grandes masas con órbitas altamente elípticas. Esos objetos proporcionan los efectos más grandes para que nuestras técnicas Doppler trabajen en ellos. Un planeta de masa semejante a Júpiter, en una órbita circular a 5 UA de la estrella madre, será — por el momento — indetectable. Todavía no podemos deducir de estas estadísticas que los "buenos Júpiteres" son raros. Por otro lado, es posible que tuviéramos

suerte; nos encontramos con un "buen Júpiter" — uno que posee una órbita circular estable. Tal vez la mayoría de los sistemas planetarios no son tan afortunados; ¿tal vez los Júpiter "malos" son la norma?

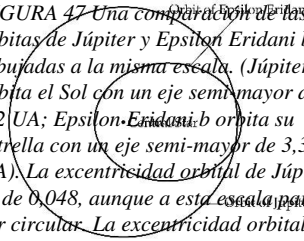


FIGURA 47 Una comparación de las órbitas de Júpiter y Epsilon Eridani b, dibujadas a la misma escala. (Júpiter orbita el Sol con un eje semi-mayor de 5,2 UA; Epsilon Eridani b orbita su estrella con un eje semi-mayor de 3,36 UA). La excentricidad orbital de Júpiter es de 0,048, aunque a esta escala parece ser circular. La excentricidad orbital del planeta que orbita Epsilon Eridani es de 0,6 — que es notablemente elíptica.

¿Qué hay de los sistemas planetarios sin Júpiter —ni buenos ni malos— en absoluto? No está claro si los sistemas planetarios pueden formarse sin formar también gigantes gaseosos masivos como Júpiter. Incluso si tales sistemas *pueden* formarse, pueden no ser más conducentes a la vida que los sistemas que contienen un "mal Júpiter". Nuestro Júpiter ha jugado dos roles vitales para la vida en la Tierra: el de deflector y el de proveedor de agua.

En su primer papel, la gran masa de Júpiter causa que los objetos extraviados en órbitas elípticas, que de otra manera podrían golpear la Tierra, sean expulsados del Sistema Solar o que sus órbitas se vuelvan circulares y por lo tanto menos peligrosas.

Y si ninguna de estas cosas sucede, Júpiter en sí mismo es el objetivo más grande para los objetos rebeldes. En 1994, por ejemplo, el cometa Shoemaker-Levy 9 golpeó Júpiter; si hubiera golpeado a la Tierra, la vida en nuestro planeta ahora sería bastante diferente.

FIGURA 48 En 1994, el cometa Shoemaker-Levy 9 golpeó Júpiter. Si hubiera golpeado la Tierra, la devastación habría sido inmensa.

En su segundo papel, que cumplió a principios de la historia del Sistema Solar, Júpiter hizo que los asteroides se acumularan en embriones planetarios del tamaño de Marte con órbitas elípticas inestables. Los objetos del Sistema Solar en órbitas elípticas son más propensos a colisionar con objetos en órbitas circulares; y algunos de los protoplanetas colisionaron con la Tierra. Si tales colisiones ocurrieran ahora, los resultados serían cataclísmicos. En aquel entonces, sin embargo, los resultados demostraron ser beneficiosos en última instancia. La Luna puede haber sido el resultado de una de esas colisiones, y nuestros océanos pueden haber sido el resultado de otras colisiones. Si el trabajo reciente que sugiere que los océanos de la Tierra provienen de asteroides es correcto, entonces implica que, sin un Júpiter a la distancia

correcta para lanzar asteroides portadores de agua en nuestro camino, la Tierra podría ser ahora un desierto.[196]

Las simulaciones por computadora indican que un planeta de Júpiter-masa que se forma en las regiones muy distantes de un sistema planetario permite que un planeta de la Tierra-masa se forme con mucha agua — pero sólo a 4 o 5 UA, que está muy lejos de la zona habitable. Así que parece que un sistema planetario no sólo necesita un "buen Júpiter", sino uno a la distancia exacta, de lo contrario el agua del sistema está atrapada en un cinturón de asteroides o congelada en planetas terrestres. Y por lo que sabemos, si un planeta no tiene agua líquida, entonces no tiene vida.

* * *

Entonces, ¿la existencia de Júpiter, nuestro "Gran Hermano", explica la paradoja de Fermi? Como una explicación por sí sola, lo dudo — aunque por supuesto puede ser otro factor que cause que la vida sea rara. Mi suposición es que, a medida que lleguen más datos, descubriremos muchos sistemas planetarios con "buenos Júpiteres". E incluso si los "buenos Júpiter" *son* raros, seguramente se están extendiendo las cosas para pasar de decir que Júpiter jugó un papel beneficioso en el desarrollo del Sistema Solar a decir que un planeta del tamaño de Júpiter a unos 5 UA es *esencial* para que exista vida en un planeta terrestre. Tal vez otros arreglos de objetos en un sistema planetario puedan conducir a zonas habitables. Nuestro fracaso en descubrir estos arreglos puede ser simplemente un fracaso de nuestra imaginación.

Por otro lado, vemos varias coincidencias agradables en nuestro Sistema Solar — y Júpiter juega un papel en la mayoría de ellas. ¡Quizás tengamos que agradecerle a Júpiter por muchas cosas! La siguiente sección describe otra razón por la cual la vida avanzada en la Tierra no podría haberse desarrollado sin Júpiter.

SOLUCIÓN 38: LA TIERRA TIENE UNA ÓPTIMA "BOMBA DE EVOLUCIÓN"

Cuando se produce resonancia, una pequeña fuerza de entrada puede producir grandes desviaciones en un sistema.

Informe sobre el derrumbe del Puente del Estrecho de Tacoma

Júpiter juega un papel clave en otra propuesta de resolución de la paradoja de Fermi — una que profundiza en una idea mencionada en la sección anterior. La sugerencia se debe al físico John Cramer.[197]

Los grandes meteoros a veces golpean la Tierra; pero ¿de dónde vienen? Una idea es que caen hacia la Tierra desde el Cinturón de Asteroides — pero para que esta idea funcione, un gran número de asteroides deben ser perturbados desde sus órbitas estables y luego caer hacia la parte interna del Sistema Solar. ¿Por qué los asteroides deben ser empujados lejos de sus órbitas estables? No se conocía ningún mecanismo que pudiera hacer esto; entonces, en 1985, George Wetherill destacó la importancia de la brecha en el Cinturón de Asteroides a una distancia de 2,5 UA.[198]

Los anillos de Saturno y las *brechas de Kirkwood* en el Cinturón de Asteroides ya eran bien conocidos. Las brechas ocurren debido a los efectos de resonancia. En el caso de la brecha a 2,5 UA, la resonancia ocurre porque cualquier asteroide a esa distancia orbita precisamente en 1/3 del tiempo que Júpiter toma para orbitar el Sol. Por lo tanto, cada tercera vez que un asteroide ubicado a 2,5 UA alcanza una posición particular, Júpiter está en la misma posición relativa. El empujón gravitacional que Júpiter da al asteroide está siempre en la misma dirección, y el efecto es acumulativo. Es como llevar un balanceo a la frecuencia correcta: los efectos se acumulan y la amplitud del balanceo aumenta. Con el tiempo, por lo tanto, la órbita de un asteroide en 2.5UA se vuelve inestable, y se aleja — y el Cinturón de Asteroides es eventualmente despejado de objetos en esta región. (Cualquier asteroide que deambula en esta región desde otro lugar es eventualmente expulsado por el mismo mecanismo. La brecha de Kirkwood en 2,5 UA se debe a una resonancia 3:1; también existen otras brechas, basadas en otras resonancias con Júpiter.

¿A dónde van los asteroides cuando son expulsados de la brecha de Kirkwood a 2.5 UA? Los cálculos muestran que hay una alta probabilidad de que sus órbitas crucen la órbita de la Tierra. En otras palabras, existe la posibilidad de que estos asteroides golpeen la Tierra — con consecuencias catastróficas.

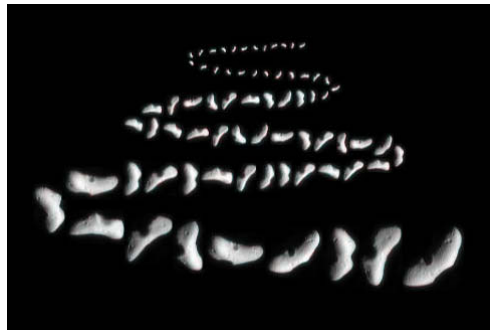


FIGURA 49 Un montaje de imágenes de Eros; las imágenes fueron tomadas durante tres semanas cuando la nave espacial NEAR se acercó al asteroide. Los asteroides cercanos a la Tierra como Eros son relativamente pocos en número. La mayoría de los asteroides están en el "cinturón principal", orbitando el Sol en un toro entre Marte y Júpiter. Son estos asteroides del "cinturón" los que pueden ser perturbados desde sus órbitas por la influencia gravitacional de Júpiter — con resultados potencialmente devastadores.

Sin embargo, aunque los efectos del impacto de un asteroide pueden ser desastrosos para cualquier criatura que se encuentre alrededor, a *largo* plazo los impactos pueden ser beneficiosos. Después de todo, si el impacto de los meteoritos de hace 65 millones de años no hubiera ocurrido, entonces la Tierra todavía podría ser el hogar de los dinosaurios, y los mamíferos todavía podrían estar raspando su sustento en los márgenes de un mundo dominado por los lagartos. Cramer señala que puede haber períodos geológicos en los que nada le sucede a las especies; la evolución parece tomar la actitud de sentido común de "si no está roto, no lo arregles". Es principalmente en los puntos de crisis, cuando por alguna razón el medio ambiente cambia, que la evolución funciona rápidamente y surgen nuevas especies para aprovechar las condiciones alteradas. La evolución, en palabras de Cramer, parece estar "impulsada" por ciclos de crisis y estabilidad. Y, sugiere, una bomba ideal es aquella que impulsa la evolución a través de crisis importantes cada 20 a 30 millones de años. Los asteroides de la brecha 3:1 de Kirkwood pueden proporcionar una bomba a la velocidad exacta.

Si la idea de Cramer es correcta — y él sería el primero en admitir que la idea es especulativa — constituye otra razón por la que la vida en la Tierra podría ser especial. La vida no sólo podría requerir un ambiente similar al de la Tierra, sino que el ambiente podría tener que ocurrir en un sistema con masas planetarias y órbitas que producen una resonancia en un Cinturón de Asteroides a la velocidad justa. Si la "bomba de la evolución" corre demasiado rápido — y los asteroides golpean un planeta portador de vida con demasiada frecuencia — entonces la vida nunca tiene la oportunidad de evolucionar la inteligencia. Si la bomba funciona demasiado lento — y los asteroides golpean un planeta portador de vida muy raramente — entonces la vida se atasca en una rutina. El resultado es un planeta lleno de trilobites o cucarachas o dinosaurios (o, más probablemente, criaturas que difieren de las criaturas terrestres en una miríada de maneras fascinantes). Mientras estas criaturas tuvieran éxito, en un entorno inmutable no habría "necesidad" de que

adoptaran nuevos modos de comportamiento, ni "necesidad" de que desarrollaran inteligencia y, por ende, radiotelescopios o naves estelares.

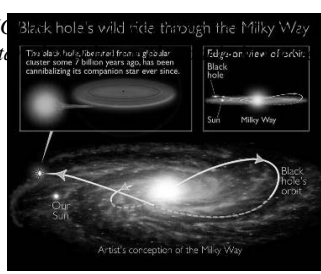
La existencia del Cinturón de Asteroides se debe a Júpiter: el Cinturón es el remanente de un protoplaneta cuya formación fue abortada debido a la propia formación de Júpiter. Y la resonancia 3:1 en el Cinturón también se debe a Júpiter. Si existe tal cosa como una "bomba de evolución", y si está sintonizada al nivel correcto en nuestro sistema planetario, entonces tenemos que agradecerle a Júpiter por ello.

SOLUCIÓN 39: LA GALAXIA ES UN LUGAR PELIGROSO

Me he convertido en la muerte, el destructor de mundos.
Bhagavadgita

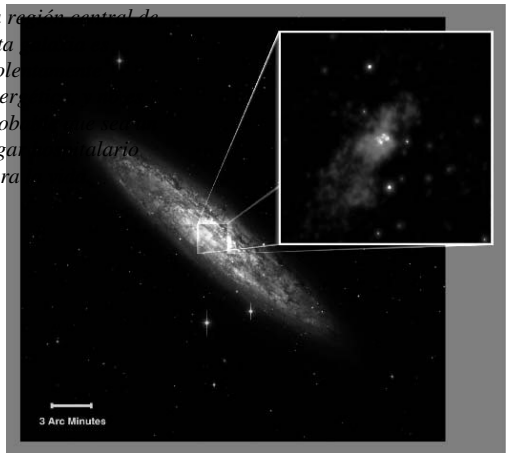
Una realización clave de la astronomía moderna es que el Universo es un lugar peligroso. Ahora sabemos que los fenómenos violentos son comunes y plantean diversas amenazas. Un agujero negro extraviado que se adentraría en un sistema planetario devoraría los planetas y cualquier vida que albergaran. (Sabemos que existen agujeros negros. Algunos astrónomos estiman que un millón de ellos pueden estar vagando por el espacio interestelar. ¿Podría ser que uno de ellos se dirigiera hacia nosotros? Las estrellas de neutrones llamadas *magnetares* representarían una amenaza interesante si se acercaran demasiado. (El 27 de agosto de 1998, varios detectores en órbita registraron la radiación del magnetar SGR 1900+14. La radiación llegó a 30 millas de la superficie de la Tierra. Afortunadamente, nuestra atmósfera nos protegió, como lo hace de una variedad de formas de radiación cósmica. SGR 1900+14 está a 20.000 años luz de distancia, así que nuestra atmósfera ¿nos habría salvado si la magnetar hubiera estado más cerca?[199]) Una galaxia podría poseer un núcleo violentamente activo, lo cual es bastante mortal. (La región central de nuestra propia Galaxia, aunque no tan activa como objetos como *blazars*, por ejemplo, es sin embargo inhóspita. Cerca del centro, las estrellas están tan llenas que el cielo nocturno sería lo suficientemente brillante como para leer; más cerca aún, y te encuentras con el disco de acreción de un agujero negro de un millón de masas solares. Esta es la razón por la que el borde interior de la ZGH está definido por el punto en el que las regiones centrales violentas ya no son una amenaza.

FIG *en*
est *ar.*


Black hole's wild ride through the Milky Way
This black hole, liberated from a globular cluster some 7 billion years ago, has been cannibalizing its companion star ever since.
Edge-on view of orbit
Black hole
Sun
Milky Way
Black hole's orbit
Our Sun
Artist's conception of the Milky Way

¿Podría ser esta la explicación de la paradoja de Fermi? ¿Podría la violencia aleatoria de un universo indiferente explicar el silencio? ¿Se destruyen las civilizaciones antes de que puedan llegar a nosotros?

FIGURA 51 Una imagen del Telescopio Espacial Hubble del centro de la galaxia NGC253.



La región central de esta g… violen… energ… prob… lugar … para …

Los tres mecanismos mencionados anteriormente — agujeros negros perdidos, magnetares, y núcleos galácticos activos — no explican por sí mismos, o como grupo, por qué nuestra Galaxia es silenciosa. Los agujeros negros y magnetares podrían representar una amenaza para estrellas individuales o grupos estelares durante el curso de la vida de la galaxia, pero no pueden actuar como un agente esterilizante para toda la galaxia; y aunque el centro de la galaxia es probablemente un lugar a evitar, no parece proporcionar ninguna amenaza a la vida aquí en los brazos en espiral, a unos 30.000 años luz de la acción. Por otro lado, otros dos mecanismos —las supernovas y los estallidos de rayos gamma— podrían resolver la paradoja de Fermi.

Supernovas

Una supernova es la explosión cataclísmica de una estrella que envejece. Tales explosiones son poderosas y ocurren con bastante frecuencia en una escala de tiempo astronómica: la Galaxia alberga en promedio una o dos supernovas por siglo.

Hay dos tipos de supernova. Una supernova de tipo Ia resulta cuando una enana blanca en un sistema binario alcanza una masa crítica después de succionar material de su compañero. Una violenta explosión termonuclear se enciende y hace estallar la estrella. Una supernova de Tipo II ocurre en las últimas etapas de la vida de estrellas masivas. Cuando el núcleo de una estrella masiva ya no produce suficiente energía para sostenerse contra la implacable fuerza de la gravedad, la estrella colapsa bajo su propio peso. El núcleo forma una densa estrella de neutrones o incluso un agujero negro; las capas externas de la estrella rebotan desde el núcleo a alta velocidad y se dirigen al espacio, donde se convierten en parte del medio interestelar. (La vida en la Tierra no existiría si no fuera por una antigua supernova del Tipo II que sembró el espacio con elementos pesados cocinados en su núcleo. Los detalles de los dos tipos de explosión son diferentes, pero ambos tipos irradian

grandes cantidades de energía. En el transcurso de unas pocas semanas, una supernova puede liberar hasta 10^{44} J en una variedad de formas.

Una supernova cercana podría ser desastrosa para la vida en la Tierra. Una estimación es que cualquier supernova que explote en cualquier lugar dentro de los 30 años luz de la Tierra podría destruir la mayor parte de la vida en la superficie de nuestro planeta.

Sin embargo, el mecanismo de destrucción no es obvio. Por ejemplo, aunque una supernova de Tipo Ia es intrínsecamente el tipo más brillante de supernova, incluso con el máximo brillo no tendría que estar más allá de un año luz para aparecer tan brillante como el Sol. En una escala astronómica esto está extremadamente cerca, así que no tenemos nada que temer de los fotones ópticos de la supernova. Las supernovas tipo II emiten grandes cantidades de neutrinos, y tal vez el gran flujo de neutrinos de una supernova cercana podría tener efectos nocivos sobre los organismos. Pero es difícil creer que los flujos de neutrinos puedan conducir a eventos de extinción masiva. No, la verdadera amenaza es la enorme cantidad de radiación gamma que una supernova cercana arrojaría a la atmósfera terrestre. La radiación gamma directa de la explosión probablemente no nos dañaría, porque la atmósfera superior proporciona un escudo eficaz. Sin embargo, los rayos gamma harían que el nitrógeno atmosférico se disociara, el nitrógeno reaccionaría con el oxígeno para formar óxido nítrico, y el óxido nítrico reaccionaría con el ozono, agotando así rápidamente la capa de ozono. Los niveles de ozono podrían reducirse hasta en un 95% durante varios años. Con la capa de ozono de la Tierra abajo, la vida en la superficie no tendría nada que protegerla de los letales rayos UV del Sol. La supernova, en otras palabras, mata por un clásico golpe de uno-dos: primero la radiación gamma disminuye nuestras defensas, luego la radiación UV solar devasta la vida multicelular.

FIG… …olo Sur en 200… …cercana podría redu… …ozono en todo el mund…

Como discutiremos más adelante, ha habido varios eventos de extinción de masas desde que la vida multicelular se apoderó de la tierra. ¿Alguno de ellos puede atribuirse a los efectos de una supernova local? Es difícil decirlo con certeza. Como parece cada vez más probable, la última extinción masiva —en la que perecieron los dinosaurios— se debió a los efectos de un impacto de meteorito. Tal vez las otras grandes muertes fueron causadas por impactos similares; o tal vez se debieron al cambio climático; o tal vez fueron simplemente eventos caóticos que pueden ocurrir en sistemas complejos. No

existen pruebas que vinculen las extinciones masivas con las secuelas de las supernovas. Incluso si las supernovas pueden causar extinciones masivas, no es seguro que las extinciones representen una amenaza a largo plazo para la aparición de la inteligencia. Tal vez, de hecho, las supernovas son necesarias para la vida inteligente. Tal vez, para usar la frase de Cramer, constituyan otra "bomba de evolución". Por el momento, sin embargo, asumamos que una supernova cercana puede causar un evento de extinción masiva, y que tal evento retarda el desarrollo de la vida inteligente.

Puesto que todas las estrellas, incluyendo el Sol, se mueven a través del espacio, en el curso de los eones, los movimientos estelares aleatorios acercarán al Sol a una supernova. Eventualmente, una supernova *puede* explotar cerca de la Tierra. (En caso de que algún lector esté preocupado, ninguna estrella a 60 años luz de nosotros se convertirá en supernova en los próximos millones de años. La pregunta crítica es: ¿con qué frecuencia es probable que un evento de supernova ocurra lo suficientemente cerca de la Tierra como para causar un evento de extinción masiva? Las estimaciones típicas son que un evento de supernova ocurrirá dentro de los 30 años luz de la Tierra en promedio cada par de 100 millones de años. Si eso es cierto, tenemos otra pregunta que hacer. ¿Por qué estamos aquí?

Una respuesta a esta pregunta podría ser simplemente que los cálculos de la frecuencia de las supernovas son erróneos; o (lo cual es bastante probable) quizás no entendemos completamente los efectos de una supernova cercana. En este caso, no hay ninguna implicación para la paradoja de Fermi. Pero quizás estamos aquí porque la Tierra ha sido extremadamente afortunada; quizás la Tierra no ha visto una supernova realmente cercana desde el surgimiento de la vida en la tierra. Si esto es cierto, entonces podemos resolver la paradoja de Fermi diciendo que todos los demás planetas portadores de vida han sido menos afortunados que la Tierra.

Sin embargo, recurrir a la suerte es una explicación pobre. Y no hay evidencia astrofísica para suponer que la Tierra haya sido particularmente afortunada con respecto a las supernovas. Si hemos tenido suerte, entonces no hay razón para suponer que, en el pasado, otras regiones de la galaxia no tuvieron también una racha de buena suerte. De hecho, si aceptamos que la vida inteligente es común, entonces las supernovas no son lo suficientemente efectivas para explicar la paradoja de Fermi. Inevitablemente, por el ciego funcionamiento del azar, algunas civilizaciones nunca se acercarán a una supernova y por lo tanto tendrán tiempo para desarrollar viajes espaciales. Y una vez que colonizan otras partes de la galaxia, ninguna supernova puede detenerlos. (Por lo tanto, ¡la amenaza de supernovas es otro factor motivador para que las CETs se involucren en la colonización interestelar! Una vez que una civilización ha colonizado estrellas dentro de un radio de aproximadamente 30 años luz del mundo natal, sobrevivirán a los efectos de una supernova local).

Lo que necesitamos si queremos explicar la paradoja de Fermi es un

mecanismo que puede afectar a la vida en todos los planetas de la galaxia, sin excepción. Si hubiera algún mecanismo que generara un evento de esterilización suficientemente poderoso en toda la galaxia, podría operar con bastante poca frecuencia (cada pocos cientos de millones de años, por ejemplo) y seguir siendo una explicación de la paradoja de Fermi. La vida multicelular sería erradicada antes de que la inteligencia tuviera la oportunidad de surgir; una civilización nunca podría avanzar a la etapa en la que podría desarrollar contramedidas efectivas a la amenaza. Las CETs putativas no habrían tenido miles de millones de años para colonizar la Galaxia; en cambio, tendrían los pocos cientos de millones de años desde el último evento de esterilización. En esencia, el "Reloj Universal" se reajustaría cada vez que se produjera un evento de esterilización.

Parece increíble que cualquier fenómeno pueda causar una devastación tan generalizada. Desafortunadamente, los astrónomos ahora saben de un potencial mecanismo de esterilización en toda la galaxia: el poder devastador de un estallido de rayos gamma (ERG).

Estallidos de Rayos Gamma

Los estallidos de rayos gamma fueron descubiertos por accidente hace más de 30 años, pero hasta hace poco su origen era completamente desconocido.[200] Incluso ahora, el origen físico preciso de los ERG es objeto de un intenso debate entre los astrónomos. Cualquiera que sea el evento progenitor, el hecho importante acerca de un ERG es este: la bola de fuego ERG es el fenómeno más poderoso en el Universo conocido. Un ERG derrama más energía en pocos segundos de la que el Sol generará en toda su vida útil. Un ERG brilla tan brillantemente que nuestros detectores pueden verlos desde la mitad del Universo. Todos los ERGs que hemos detectado hasta ahora parecen haber ocurrido en galaxias distantes; si uno ocurriera en nuestra Galaxia, sería una mala noticia. Tenemos que hacer dos preguntas. Primero, ¿con qué frecuencia ocurren los ERGs en nuestra Galaxia? Segundo, si nuestra Galaxia fuera anfitriona de un evento de ERG, ¿qué tan mal estarían las cosas?

¡Calcular la frecuencia de ocurrencia de los ERGs Galácticos es un problema típico de Fermi! Sucede que una galaxia alberga un ERG aproximadamente una vez cada 100 millones de años. Curiosamente, esta dura escala de tiempo es más o menos la escala de tiempo entre eventos de extinción masiva en la Tierra. La gente ha sugerido, por lo tanto, que los ERG podrían ser responsables de extinciones masivas.

El impresionante poder liberado por los ERG significa que, incluso si uno ocurriera a una gran distancia de la Tierra, nuestro planeta aún estaría bañado en radiación. Además, el mismo ERG podría causar devastación en toda la galaxia. Los pesimistas sugieren que un ERG podría esterilizar la Galaxia.

Sin embargo, esta sugerencia está muy abierta al debate. Los estallidos de rayos gamma son innegablemente más poderosos que las supernovas, por lo

que podrían estar a distancias mucho mayores y seguir infligiendo el mismo tipo de daño a la capa de ozono, a través de los mismos procesos. Pero hay una diferencia.

La frecuencia de los estallidos de rayos gamma

Un detector de rayos gamma como BATSE (*Burst and Transient Source Experiment*) a bordo del Observatorio de Rayos Gamma Compton de la NASA detecta en promedio un ERG por día. El BATSE cubre alrededor de un tercio del cielo, y por lo tanto cerca de tres ERGs ocurren en el Universo cada día — o cerca de 1000 cada año. Como una estimación aproximada, podemos suponer que hay 10^{11} galaxias en el Universo; así que en promedio hay 10^{-8} ERGs por galaxia por año. En otras palabras, para una primera aproximación con la que Fermi estaría feliz, una galaxia típica albergará un ERG aproximadamente una vez cada 100 millones de años. (Este cálculo asume que los ERG emiten su energía igualmente en todas las direcciones. Si los ERG emiten su energía en un rayo, como algunas teorías sugieren, entonces los ERG que detectamos serían aquellos con rayos que por casualidad apuntan hacia nosotros. Por lo tanto, la tasa total de eventos de ERG sería mucho más alta, para tener en cuenta los ERG con haces que apuntan en otra dirección. Para nuestros propósitos, sin embargo, no necesitamos considerar este punto).

Mientras que un evento de supernova ocurre durante un período de tiempo bastante largo, un ERG bombea la mayor parte de su energía en menos de un minuto. Por lo tanto, sólo la mitad de un planeta será afectada directamente por un estallido; la otra mitad está a salvo de la explosión, ya que está protegida por la masa del planeta. Por supuesto, el daño del lado afectado del planeta *podría* propagarse y causar destrucción mundial; y los efectos secundarios podrían causar más problemas. Pero con nuestro estado actual de conocimiento, es igual de fácil argumentar que la capa de ozono de un planeta protegería la vida de la superficie de los efectos de un ERG — a menos que el ERG ocurra *demasiado* cerca, por supuesto, en cuyo caso el planeta está tostado.

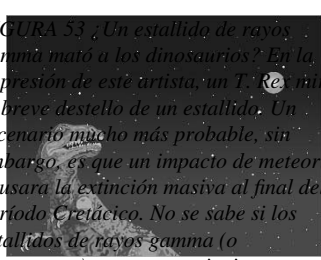


FIGURA 53 ¿Un estallido de rayos gamma mató a los dinosaurios? En la impresión de este artista, un T. Rex mira al breve destello de un estallido. Un escenario mucho más probable, sin embargo, es que un impacto de meteorito causara la extinción masiva al final del período Cretácico. No se sabe si los estallidos de rayos gamma (o supernovas) causaron extinciones masivas más tempranas.

Supongamos que aceptamos que un ERG puede destruir todas las formas

de vida superiores a través de una galaxia. Combine esto con la predicción de algunas teorías de formación de ERG de que los brotes fueron más frecuentes en el pasado, y tiene la resolución de la paradoja de Fermi propuesta por James Annis.[201] La propuesta es simple: En el pasado, los ERG esterilizaban eficazmente a los planetas antes de que cualquier forma de vida en una galaxia tuviera la oportunidad de desarrollar inteligencia. Sólo ahora que la tasa de eventos ha disminuido, y los ERG son menos comunes, ha habido tiempo para que surjan civilizaciones tecnológicamente avanzadas. Con la propuesta de Annis, no hay nada necesariamente especial sobre la Tierra o la humanidad; puede haber decenas de miles de CETs en nuestra Galaxia en o cerca de la misma etapa de desarrollo. Todos ellos habrán tenido el mismo tiempo que la vida en la Tierra para desarrollarse: la cantidad de tiempo desde que el último ERG explotó en la Galaxia.

Personalmente, creo que es poco probable que los ERG sean capaces de esterilizar galaxias enteras, y por lo tanto no acepto que los ERG por sí mismos resuelvan la paradoja de Fermi. Es innegable, sin embargo, que los ERG ocurren y son asombrosamente poderosos; ciertamente esterilizarían cualquier planeta lo suficientemente desafortunado como para estar cerca. Los optimistas del SETI — aquellos que argumentan que las civilizaciones inteligentes y tecnológicamente avanzadas son comunes — por lo tanto tienen que enfrentarse a una conclusión desagradable: en el transcurso de un Año Universal, muchas de esas civilizaciones deben haber estado a poca distancia de un ERG. Incontables cantidades de civilizaciones avanzadas deben haber sido consumidas por el fuego.[202]

SOLUCIÓN 40: UN SISTEMA PLANETARIO ES UN LUGAR PELIGROSO

El hombre nunca está lo suficientemente vigilante contra los peligros que lo amenazan cada hora.

Horacio,
Carmina, II.13

La destrucción puede venir no sólo de la larga lista de peligros celestiales. Algunas amenazas están mucho más cerca de casa. Ya hemos mencionado la preocupación más obvia: el impacto de meteoritos. Pequeños meteoritos caen a la Tierra todos los días; objetos de tamaño mediano aterrizan cada pocos años; objetos grandes — digamos, de 20 km de ancho — golpean la Tierra cada pocos cientos de millones de años. Aunque los grandes meteoritos sólo golpean la Tierra con poca frecuencia, cuando lo *hacen* causan una devastación total. Si un asteroide de 20 km de ancho chocara con la Tierra hoy en día, es casi seguro que mataría a todos los seres humanos. Multiplique la pequeña probabilidad de que ocurra un evento por el número de personas que mataría, y llegará a la probabilidad de muerte por persona para el evento. Resulta que, promediado a lo largo de una vida humana, la probabilidad de morir por el impacto de un meteorito es casi la misma que la de morir en un accidente aéreo. Paradójicamente, gastamos grandes cantidades de dinero en seguridad aérea, pero esencialmente nada en detectar los objetos cercanos a la Tierra que podrían destruir nuestra civilización.

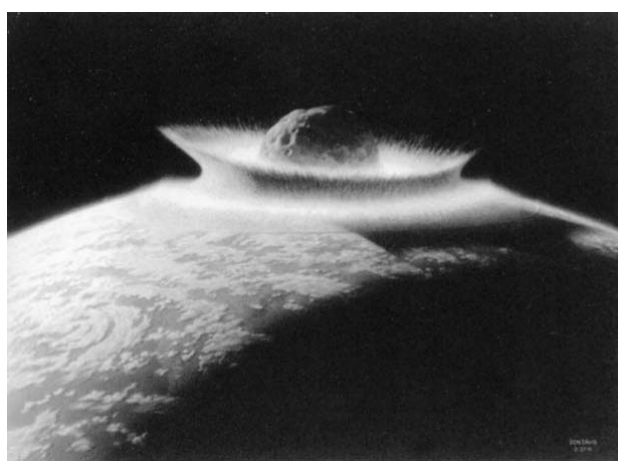


FIGURA 54 Si un meteorito como este golpea la Tierra, es casi seguro que la vida humana será aniquilada.

Presumiblemente, las CETs también tienen que lidiar con la amenaza planteada por el impacto de meteoritos, ya que estos objetos son probablemente comunes en los sistemas planetarios. Pero hay muchos otros peligros, y a continuación discuto algunos más.

Glaciación global (Superglaciación)

Las amenazas ni siquiera tienen que venir del espacio. La evidencia reciente — particularmente el descubrimiento de escombros glaciales cerca del nivel del mar en los trópicos — sugiere que, a lo largo de la historia geológica, la Tierra ha sido cubierta repetidamente por una capa de hielo. Un evento puede haber ocurrido hace 2.500 millones de años, y puede haber habido cuatro de estos eventos de la *Superglaciación* en los últimos 800 millones de años, con cada episodio durando 10 millones de años o más. No confundir estos eventos con las imágenes de los libros de texto de la última Edad de Hielo; comparado con una Superglaciación, la última Edad de Hielo fue positivamente tropical. Durante una Superglaciación, una capa de hielo de un kilómetro de espesor cubre los océanos, e incluso cubre los océanos ecuatoriales (aunque quizás no a la misma profundidad). Las temperaturas medias descienden hasta −50ºC. La mayoría de los organismos son incapaces de hacer frente a estas condiciones, y la vida sólo puede colgarse del más delgado de los hilos, tal vez alrededor de los volcanes, o bajo un hielo claro y delgado en el ecuador.[203]

Cómo nuestro planeta puede descender a una Tierra Bola de Nieve es bien entendido: La cubierta de hielo puede aumentar por una variedad de razones, y cuando aumenta el hielo refleja una cantidad creciente de luz solar directamente hacia el espacio. Esta disminución en el calentamiento solar de la superficie hace que la temperatura descienda y se forme más hielo. Una vez que se alcanza una cantidad crítica de cobertura de hielo, se produce un efecto de "refrigerador desbocado" y el planeta desciende a un evento de la Superglaciación. Lo que es difícil de entender, y lo que causó que los científicos desecharan la idea de una Superglaciación durante muchos años, es cómo el planeta puede escapar de la cubierta de hielo. Una vez que la Tierra está cubierta de hielo, la mayor parte de la luz solar que cae sobre el planeta se refleja en el espacio antes de que pueda calentar la superficie. La solución vino con la comprensión de que la actividad volcánica no se detiene durante un evento de la Superglaciación. Los volcanes bombean grandes cantidades de dióxido de carbono, un gas de efecto invernadero. Por supuesto, los volcanes siguen arrojando dióxido de carbono, pero en condiciones normales este CO_2 es absorbido por el agua de lluvia que cae, que finalmente lo lleva al océano, donde queda atrapado en depósitos de carbonato sólido en el fondo del océano. En una Superglaciación no hay agua líquida que evaporar, y por lo tanto no hay nubes, y por lo tanto no hay lluvia: durante 10 millones de años, tal vez más, el CO_2 de los volcanes se acumularía en la atmósfera. Eventualmente, habría cerca de mil veces más CO_2 atmosférico que en la atmósfera actual. Las temperaturas subirían y derretirían rápidamente el hielo: del refrigerador al invernadero en un instante geológico.

FIGURA 55 Deshielo de témpanos en aguas abiertas. En una Superglaciación las condiciones en el ecuador serían, en

el mejor de los casos, así. Todo lo demás estaría cubierto de hielo espeso.

Las implicaciones de la hipótesis de la Superglaciación son profundas, y examinaremos algunas de ellas más adelante.

Súper-volcanes

Aunque los volcanes demostraron ser el salvador de la vida durante los eventos de la Superglaciación de la era Neoproterozoica, más recientemente casi resultaron desastrosos para la vida inteligente en la Tierra: casi han acabado con el *Homo sapiens*.

Investigaciones recientes indican que, genéticamente, todos los seres humanos son notablemente similares. Para explicar esta falta de diversidad genética, algunos biólogos han sugerido que el *Homo sapiens* debe haber surgido de un "cuello de botella genético" hace unos 75.000 años. Un cuello de botella ocurre cuando el tamaño de una población se reduce dramáticamente. En el caso de nuestra especie, el número total de seres humanos vivos en la Tierra puede haber descendido hasta unos pocos miles. Casi nos extinguimos.

Si este cuello de botella realmente se produjo, entonces no tenemos que buscar lejos un arma humeante que pueda haberlo causado. El volcán Toba en Sumatra entró en erupción hace 74.000 años; tan grande fue la erupción que se ganó el título de "súper-volcán". La erupción fue *mucho* más violenta que la de los volcanes recientes como el Pinatubo y el Monte Santa Helena. Los climatólogos han sugerido que una erupción súper-volcánica puede causar un invierno volcánico — similar en efecto a un invierno nuclear, pero sin la radiación. No es inverosímil que los años de sequía y hambruna que siguieron a tal explosión puedan llevar a una especie humana pretecnológica al borde de la extinción.

Extinciones en masa

Impacto meteorológico, glaciación global, súper-volcanes. Incluso en un planeta tan plácido como la Tierra, la vida tiene que lidiar con muchas cosas. A veces, ya sea que la causa sea uno de los tres mecanismos mencionados anteriormente, o uno de los agentes celestiales de destrucción, la vida apenas se sostiene.

La vida en la Tierra ha sufrido varias extinciones masivas — un evento de extinción masiva que se define como un período que ve una reducción significativa en la biodiversidad de la Tierra. Ha habido quince eventos de este tipo en los últimos 540 millones de años. (Puede haber habido muchas más extinciones en la historia de la Tierra, particularmente en los eventos de Superglaciación, pero sólo en los últimos 500 millones de años se han vuelto comunes las criaturas con esqueletos duros; por lo que sólo relativamente recientemente las criaturas podrían convertirse en fósiles. De hecho, el tiempo desde la era Cámbrica se conoce como la era Fanerozoica, de palabras griegas que significan "vida visible". Los 4 mil millones de años antes de la era Cámbrica se conocen como la era Criptozoica, de las palabras griegas que significan "vida oculta". Durante la mayor parte de la historia de la Tierra, virtualmente todos los organismos vivieron y murieron sin dejar rastros. En seis grandes eventos de extinción en masa, más de la mitad de todas las especies entonces vivas fueron asesinadas.[204] Estos seis eventos son, en orden cronológico, el Cámbrico, el Ordovícico, el Devónico, el Pérmico, el Triásico y el Cretáceo.

La extinción del Cámbrico (en realidad dos extinciones) ocurrió hace 540 a 500 millones de años. Su causa precisa es incierta, pero de alguna manera fueron las más graves de las extinciones masivas. Durante la *explosión del Cámbrico*, una época de inmensa innovación biológica, la Naturaleza experimentó con muchos planes corporales diferentes; tal vez hasta cien *phyla* de animales diferentes evolucionaron. Todas los *phyla* de animales con los que estamos familiarizados hoy en día surgieron durante la explosión del Cámbrico, y ningún nuevo phylum ha evolucionado desde entonces. Pero durante las extinciones del Cámbrico, algunos de estos *phyla*, cada uno de los cuales contenía especies que nos parecían extrañas e incluso pesadillas, se extinguieron.[205]

La extinción de los ordovícicos hace 440 millones de años y la extinción de los devónicos hace 370 millones de años vieron desaparecer a más de una quinta parte de las familias marinas. Los efectos sobre la vida terrestre son menos conocidos, principalmente porque el registro fósil es muy pobre para estas edades. Tampoco se conoce la causa de estos eventos de extinción; si los eventos de impacto los causaron, no se han encontrado rastros de los cráteres resultantes.

La extinción del Pérmico hace 250 millones de años fue aún más severa que la extinción del Cámbrico. Quizás más del 90% de las especies marinas se extinguieron; ocho de los 27 órdenes de insectos se perdieron; la pérdida fue devastadora. La causa de este evento catastrófico es incierta; se han propuesto

varios mecanismos, posiblemente actuando en sinergia, para explicar esta catástrofe global.

La extinción del Triásico hace 220 millones de años experimentó reducciones significativas en el número de especies marinas y terrestres. Muchos científicos creen que un meteorito fue la causa de este evento de extinción.

La extinción del Cretáceo hace 65 millones de años es la más célebre y conocida de todas las extinciones masivas. Este evento vio el final de la era de los dinosaurios (y proporcionó las condiciones que llevaron al surgimiento de los mamíferos). Casi con toda seguridad, la causa de esta extinción fueron los efectos secundarios de un gran impacto de meteorito. Hay varias razones para creer en la teoría del impacto de este evento de extinción. Primero, el cráter Chicxulub de 200 km de ancho en la península de Yucatán en México es precisamente de la edad correcta. En segundo lugar, no importa de qué parte del mundo se extraigan, las muestras de rocas del límite entre el Cretáceo y el Terciario muestran una alta concentración de iridio, que es lo que uno esperaría si un gran asteroide golpeara la Tierra. Tercero, muchos de los mismos sitios contienen granos de cuarzo chocados — otra señal de un impacto violento. Cuarto, los geólogos a menudo encuentran partículas finas de hollín en las arcillas del límite Cretáceo-Terciario —partículas que podrían haber provenido sólo de la quema de vegetación; la implicación es que gran parte de la materia vegetal de la Tierra estaba en llamas.[206] El período inmediatamente posterior al impacto claramente habría matado a un gran número de organismos. El mecanismo preciso para erradicar un gran número de especies es menos claro; podría haber sido el cambio atmosférico, un invierno nuclear, incendios a largo plazo a gran escala, lluvia ácida, una combinación de estos efectos... o algo completamente distinto. Los efectos también dependían de cuándo y dónde el meteorito golpeó la Tierra, y también de la masa y velocidad del meteorito. Si el meteorito hubiera golpeado unas horas más tarde, los efectos podrían haber sido menos mortales; si el meteorito hubiera sido sólo el doble de grande, la extinción de la vida podría haber sido total.

Las extinciones y la paradoja Fermi

Es difícil decir qué podemos aprender de estos eventos de extinción. Parecen ser diferentes en carácter, causa y severidad. Sólo en los casos del Cretáceo y del Pérmico existen mecanismos causales evidentes para las extinciones. Las otras extinciones pueden haber sido causadas por algo muy diferente; después de todo, hemos considerado muchas amenazas potenciales. Las formas de vida en otros planetas presuntamente enfrentan los mismos peligros, y pueden enfrentar riesgos de que la vida en la Tierra se haya salvado. Por ejemplo, algunos sistemas planetarios pueden tener planetas portadores de vida en órbitas que se vuelven caóticas — y una extinción

masiva sería probable. O un cambio en la velocidad de rotación de un planeta podría desencadenar una extinción masiva. Cualquier cosa que cause un cambio climático extensivo — ya sea un enfriamiento global o un calentamiento fuera de las temperaturas que son tolerables para la vida animal — podría inducir una extinción masiva. Tal vez la lección sea simplemente que los sistemas planetarios son peligrosos: a lo largo de miles de millones de años, las extinciones masivas son *inevitables*.

Es un paso corto de argumentar que las extinciones masivas son inevitables a argumentar que juegan un papel en la resolución de la paradoja de Fermi. De hecho, la gente ha utilizado la idea de las extinciones masivas para sugerir dos soluciones bastante antitéticas a la paradoja. La sugerencia directa es que los eventos de extinción en masa han impedido el desarrollo de vida inteligente en otros planetas. La sugerencia más sutil es que, en la capitalización inmortal de Sellars y Yeatman, ¡las extinciones masivas son Algo Bueno que ocurre con muy poca frecuencia en otros planetas! (Al menos, el *tipo* correcto de eventos de extinción ocurren con muy poca frecuencia).

Es fácil entender por qué las extinciones masivas podrían ser una cosa mala. Mucha gente argumentaría que la vida —al menos la vida tal como la conocemos— tiene sólo dos defensas contra la extinción masiva. La primera defensa es la simplicidad: este es el enfoque adoptado por las procariotas (ver página 290), que han sobrevivido durante miles de millones de años. Las bacterias han mantenido esencialmente su plan corporal unicelular sobre los eones; de hecho, es probable, aunque difícil de probar concluyentemente, que las bacterias modernas son genéticamente idénticas a las primeras células vivientes de hace 3.700 millones de años. Su capacidad de evolucionar las respuestas bioquímicas a los nuevos desafíos ambientales les permite tomar la mayoría de las cosas que la naturaleza puede lanzarles. Sólo una catástrofe a escala masiva eliminaría toda la vida procariota de la Tierra. Por otro lado, no podemos comunicarnos con las bacterias. Cuando consideramos la pregunta de Fermi, estamos interesados en formas de vida multicelulares complejas. ¿Cómo ellas *pueden* sobrevivir a las hondas y flechas de mil millones de años de fortuna?

La segunda defensa contra la extinción masiva es la diversidad, un enfoque adoptado por animales y plantas. Si un *phyla* contiene muchas especies diferentes, si tiene diferentes maneras de ganarse la vida, entonces existe la posibilidad de que una o dos de las especies sobrevivan al evento de extinción. Más tarde, la diversidad del *phylum* puede ser repuesta. Así que aunque la vida animal y vegetal es menos resistente que la vida bacteriana, y es mucho más susceptible a la extinción, a largo plazo puede sobrevivir. (Tal vez la razón principal por la que la extinción del Cámbrico fue tan mortal es porque, aunque había muchos *phyla* diferentes, cada *phylum* contenía sólo unas pocas especies. *Phylum* enteros se extinguieron porque contenían una diversidad insuficiente. Es algo así como un tema de este libro: no pongas

todos tus huevos en una sola canasta.

No tenemos idea de cómo ha procedido la evolución en otros planetas; pero quizás la Tierra es rara en tener *phyla* con muchas especies diferentes. La vida compleja en otros mundos tiene menos probabilidades de sobrevivir a los inevitables eventos de extinción. Podemos imaginar mundos que son el hogar de muchas criaturas diferentes, extrañas, verdaderamente *extraterrestres* — criaturas que poseen una variedad de formas corporales peculiares. Podría haber un gran número de *phyla* en tales mundos —que tardaron eones en evolucionar a su estado actual. Pero si esos *phyla* están representadas sólo por unas pocas especies — bueno, cuando el meteorito golpea, o el clima se calienta, o la oblicuidad del planeta cambia, esos *phyla* bien podrían morir. Tal vez la Tierra ha tenido suerte (existe esa palabra "suerte" de nuevo). Esta es una triste resolución de la paradoja de Fermi.

Hemos encontrado la sugerencia más sutil con respecto a las extinciones masivas —es decir, que pueden ser *necesarias* para el desarrollo de la vida inteligente— cuando discutimos la sugerencia de una "bomba de evolución". Por supuesto, no sería divertido estar cerca cuando un asteroide de 20 km de ancho choca contra la Tierra o cuando las temperaturas globales caen en picado. Pero a largo plazo —una carrera medida en decenas de millones de años— la vida podría beneficiarse de tales catástrofes. Después del diluvio, nuevas y radicalmente diferentes formas tienen la oportunidad de evolucionar; la naturaleza puede usar el medio ambiente cambiado para crear y experimentar con diferentes especies, y tal vez incluso diferentes planes corporales. Ciertamente, después de los eventos de extinción en masa, la biodiversidad siempre ha recuperado el nivel de preextinción y luego lo ha superado.

Una sugerencia actualmente controvertida es que dos eventos clave en la historia de la vida en la Tierra — el desarrollo de la célula eucariota, y la explosión del Cámbrico (más de los cuales en secciones posteriores) — fueron un resultado directo del escape de los eventos de la Superglaciación. Los cambios químicos que una Superglaciación causaría en los océanos, el aislamiento genético de las especies, la gran presión ambiental sobre la vida, el aumento de la temperatura y el rápido derretimiento del hielo — todos estos factores podrían combinarse para producir un tiempo de rápida actividad evolutiva. Según algunos científicos, ni los animales ni las plantas superiores existirían hoy si no fuera por los eventos pasados de la Superglaciación.

Tal vez los eventos de glaciación global "correctos" no son comunes en otros planetas. Un planeta tiene que estar en la ZCH, tiene que tener océanos de agua, tiene que descender a un *refrigerador*, y tiene que poseer volcanes activos que arrojen gases de efecto invernadero para eliminar el hielo. Tal vez la norma para la mayoría de los planetas acuáticos es un descenso a una Superglaciación sin medios de escape; las extinciones masivas serían totales.

La extinción del Holoceno

Es imposible discutir eventos pasados de extinción masiva en la Tierra sin mencionar la *extinción del Holoceno*. La época del Holoceno abarca los últimos 10.000 años, hasta la actualidad. En otras palabras, estamos viviendo otro evento de extinción masiva. En este caso la causa es clara: la actividad humana. Cazamos especies hasta la extinción; introducimos especies exóticas en nuevos ecosistemas y causamos estragos; y, lo más importante, destruimos hábitats. No se siente como si estuviéramos en medio de una extinción masiva porque, a escala individual, 10.000 años es mucho tiempo. A escala geológica, sin embargo, es un instante. Según algunas estimaciones, el ritmo al que las especies se están extinguiendo es ahora 120.000 veces mayor que el ritmo "normal" o "de fondo".[207] Muchas de las especies que se extinguieron debido a nuestra destrucción de los bosques tropicales ni siquiera han sido documentadas. Si se mantiene el ritmo actual de extinción y continúa la destrucción de las selvas tropicales, es seguro que se producirán efectos atmosféricos y climáticos a nivel mundial. Es entonces muy probable que el *Homo sapiens* sea una de las especies que se une a la extinción. Volviendo a una solución anterior discutida en el libro, quizás una ley evolutiva general es que la inteligencia se extingue a sí misma.

SOLUCIÓN 41: EL SISTEMA DE PLACAS TECTÓNICAS DE LA TIERRA ES ÚNICO

Lo que queremos es una historia que comience con un terremoto y llegue a su clímax.

Samuel Goldwyn

Nuestro planeta ha sido destructivo en los últimos años. Los terremotos en Turquía e India han causado enormes pérdidas de vidas; los terremotos más pequeños en Estados Unidos y Japón han causado inconvenientes; y mientras escribo, el Monte Etna está arrojando lava que amenaza el sustento de varios cientos de aldeanos.[208] Por lo tanto, parece extraño que algunos geólogos consideren que la existencia de la *tectónica de placas* —el proceso que da lugar a terremotos y erupciones volcánicas— es necesaria para la existencia de vida compleja. Pero hay una razón seria para creer que tres fenómenos — la vida, los océanos de agua y la tectónica de placas — están vinculados. Y esta conexión puede ser única en la Tierra.

* * *

Los diversos planetas del Sistema Solar tienen diferentes métodos para disponer de su calor interno. En el caso de la Tierra, el calor generado por la desintegración radioactiva en el interior es transportado por el método convectivo conocido como tectónica de placas. Considere lo que sucede cerca de una dorsal oceánica. El material caliente de la región del manto profundo de la Tierra es traído a la superficie en una celda de convección, y en la superficie se expande y solidifica en la corteza del océano — se convierte en parte de la litósfera. Sobre escalas de tiempo geológicas, el nuevo material flota sobre el manto caliente debajo de él y se aleja de donde nació. Durante este proceso enfría y recoge masas de rocas ígneas. El material se hace más pesado, y después de muchas decenas de millones de años se hunde, bajo su propio peso, profundamente en el manto en lugares llamados *zonas de subducción*. Eventualmente, el ciclo se repite. En las escalas de tiempo geológicas, las regiones exteriores de nuestro planeta se asemejan a una de esas lámparas kitsch de lava.[209]

Algunos científicos piensan que la tectónica de placas puede ser el requisito más importante para el desarrollo de la vida animal. Hay varias razones por las que la tectónica de placas podría ser vital. Veamos sólo tres de ellos.

Primero, el mecanismo de la tectónica de placas parece importante en la creación del campo magnético de la Tierra. La teoría del magnetismo planetario es formidablemente complicada, pero, en esencia, los planetas generan un campo magnético por medio de un dínamo interno. Tal dínamo

requiere tres cosas: el planeta debe rotar, debe contener una región con un fluido conductor de electricidad, y debe mantener la convección dentro de la región del fluido conductor. Es difícil estar seguro, pero en el caso de la Tierra parece probable que sin la tectónica de placas las células convectivas dejarían de exportar calor a la superficie, el dínamo no funcionaría, y el campo magnético de la Tierra sería una pequeña fracción de su valor actual. La relevancia de todo esto es simple: El campo magnético de la Tierra ayuda a evitar que las partículas de alta energía del viento solar dispersen las partículas atmosféricas en el espacio; con el tiempo, este tipo de chisporroteo podría provocar la disipación de la atmósfera de la Tierra. En resumen, sin el campo magnético de la Tierra la vida superficial no habría podido evolucionar.

Segundo, la tectónica de placas, o *deriva continental*, creó los continentes de la Tierra — y continúa refrescándolos. Los continentes son importantes. Un mundo con una mezcla de océanos, islas y grandes continentes es más probable que ofrezca desafíos evolutivos que un mundo dominado únicamente por el agua o la tierra. Además, la tectónica de placas causa que las condiciones ambientales se alteren, y por lo tanto ayuda a promover la especiación. (Por ejemplo, supongamos que la división de un pedazo de tierra de una masa de tierra continental resulta en una especie particular de ave que vive tanto en la nueva isla como en el continente original. Con el tiempo, el medio ambiente de la isla será diferente del medio ambiente continental; las aves se enfrentarán a diferentes desafíos y evolucionarán de diferentes maneras. Con el tiempo, habrá dos especies donde antes había una.) La tectónica de placas promueve así la biodiversidad, que, como hemos visto, es importante en tiempos de extinción masiva. Cuanto mayor sea el número de especies, mayores serán las posibilidades de que algunas de ellas sobrevivan a la extinción.

En tercer lugar, y lo más importante, durante mil millones de años o más, la tectónica de placas ha desempeñado un papel clave en la regulación de la temperatura de la superficie de la Tierra. El clima de nuestro planeta se ha equilibrado durante mucho tiempo en el filo de una navaja de afeitar. Si la temperatura desciende demasiado y los casquetes glaciares comienzan a aumentar de tamaño, puede producirse un efecto de refrigerador desbocado: La tierra se congela. Si la temperatura aumenta demasiado, y los océanos comienzan a hervir a fuego lento, entonces el vapor de agua adicional en la atmósfera causa un efecto invernadero desbocado: La tierra hierve. Ciertos procariotas podrían sobrevivir a estos extremos de temperatura, pero las formas de vida complejas pueden florecer sólo en un rango mucho más estrecho de temperaturas. La tectónica de placas, según algunos científicos, tiene un mecanismo de ajuste fino que mantiene el termostato planetario ajustado “en su punto” para la vida animal.

La forma en que la tectónica de placas controla la temperatura es bastante complicada, y más de un mecanismo está involucrado.[210] Sin embargo, el

papel clave que juega es en su regulación del dióxido de carbono atmosférico. El CO_2 es un gas de efecto invernadero eficaz: si la atmósfera contiene demasiado CO_2, entonces las temperaturas globales pueden aumentar (como la humanidad parece empeñada en demostrar experimentalmente). Por otro lado, si hay muy poco CO_2 atmosférico, entonces la Tierra no se beneficia del efecto invernadero y el planeta se enfría.

FIGURA 56 El Monte Etna, en Sicilia, es el volcán más grande de Europa. Aunque volcanes como este pueden ser tremendamente destructivos (aunque no tan destructivos como los súper-volcanes), son un resultado importante de la tectónica de placas y también pueden ser vital para la vida.

Ahora, el CO_2 no permanece en la atmósfera indefinidamente. El dióxido de carbono reacciona con el agua formando ácido carbónico; la lluvia lo "lava" de la atmósfera. Este ácido carbónico erosiona las rocas de la superficie de la Tierra, y los productos químicos de esta erosión son transportados por los ríos al océano. Los productos terminan como carbonato de calcio ($CaCO_3$) y cuarzo (SiO_2) en el fondo marino, tanto por la formación de rocas como por la formación de las conchas de organismos vivos. Eventualmente, el mecanismo de la tectónica de placas causa que este $CaCO_3$ y SiO_2 sean llevados hacia las profundidades de la Tierra. De esta manera, se elimina el CO_2 atmosférico. ¡Pero ese no es el final de la historia! Las altas temperaturas y presiones en las profundidades de la Tierra convierten el carbonato de calcio en CO_2 y CaO. La tectónica de placas luego recicla el CO_2 — y muchos otros materiales útiles — creando volcanes (que emiten enormes cantidades de CO_2; como vimos antes, este mecanismo permitió escapar de los episodios de la Superglaciación).

Si el CO_2 atmosférico no fuera reemplazado, la Tierra sufriría un enfriamiento global. ¿Pero qué pasa si se devuelve demasiado CO_2 a la atmósfera? ¿No corremos el riesgo de un efecto invernadero desbocado? Resulta que, a medida que el planeta se calienta, la erosión química de las rocas aumenta — lo que causa que más CO_2 sea removido de la atmósfera, lo que causa que el planeta se enfríe (disminuyendo así la velocidad a la que el CO_2 es removido del sistema, lo que causa que el planeta se caliente... y así sucesivamente, en un mecanismo clásico de retroalimentación). Este ciclo de CO_2-silicato es bastante complicado, y los detalles no se entienden completamente, pero el ciclo parece ser crucialmente importante para la estabilización a largo plazo de la temperatura global.

Uno puede argumentar que el desarrollo de la vida animal aquí en la Tierra *requería* una tectónica de placas para promover la biodiversidad, generar un campo magnético, estabilizar la temperatura global, etc. Y sin embargo, no hay nada inevitable en la tectónica de placas. Sólo la Tierra, hasta donde sabemos, utiliza este mecanismo para deshacerse de su calor interno. Quizás

el proceso es raro, y otros planetas carecen de vida animal porque carecen de tectónica de placas.

No sabemos con qué frecuencia ocurrirá la tectónica de placas porque carecemos de una buena teoría general del proceso. El tipo de preguntas que uno podría hacerse — ¿Cómo depende la existencia de la tectónica de placas de la masa de un planeta? ¿Cómo depende de la composición química del manto? no se puede responder con los modelos actuales, por lo que es imposible proporcionar una buena estimación de cuántos planetas podrían desarrollar y mantener la tectónica de placas. En ausencia de hechos concretos, ya sea del experimento o de la teoría, uno puede argumentar de cualquier manera. Algunos científicos creen que la colisión titánica que formó la Luna puso las semillas a partir de las cuales se desarrolló la tectónica de placas; en este caso, la tectónica de placas puede ser rara. Por otro lado, las condiciones básicas para la tectónica de placas parecen relativamente simples: un planeta debería tener una fina corteza flotando sobre una región caliente y fluida que sufre convección debido al aumento del calor del núcleo. Quizás los océanos de agua también son necesarios para "ablandar" la corteza y permitir la subducción. Tales afecciones probablemente no son raras. Escasa, tal vez, pero no rara. En otras palabras, simplemente no sabemos si la tectónica de placas es común o no.

Incluso si la tectónica de placas es rara, ¿significa necesariamente que la vida animal es rara? Aunque la tectónica de placas parece haber desempeñado (y sigue desempeñando) un papel beneficioso para el desarrollo de la vida en la Tierra, ¿es el *único* mecanismo que puede proporcionar estos beneficios? La tectónica de placas es un proceso extremadamente complicado y poco comprendido; la existencia misma del ciclo CO_2— silicato sólo se conoce desde hace dos décadas. En casos como estos, a menudo ocurre que hay más de una manera de despellejar a un gato. Tal vez ahora mismo los científicos de un planeta orbitando una estrella anónima de la clase M se están maravillando con el mecanismo de enfriamiento de su mundo y cómo casi milagrosamente estabiliza su medio ambiente global.

Mi suposición es que —como tantos factores que hemos discutido— la posible rareza de la tectónica de placas es por sí misma insuficiente para proporcionar una respuesta a la paradoja de Fermi. Pero puede ser otro factor que haga menos probable que las CETs se desarrollen en otros planetas.

SOLUCIÓN 42: LA LUNA ES ÚNICA

Como una reina sale de la luna solitaria.
George Croly,
Diana

La última vez que lo comprobé, los astrónomos habían encontrado 68 satélites orbitando los planetas del Sistema Solar. Por lo tanto, parece absurdo sugerir que nuestra Luna es única, mucho menos que la Luna tenga algo que ver con la paradoja de Fermi. Sin embargo, durante décadas ha habido una persistente sospecha de que lo que hace especial a la Tierra es la Luna.

Para entender por qué la existencia de la Luna podría resolver la paradoja de Fermi, necesitamos responder a tres preguntas. Primero, ¿de qué manera es inusual la Luna? Segundo, ¿qué tan probable es que satélites similares a los de la Tierra existan en otros sistemas planetarios? Tercero, ¿de qué manera podría haber sido *necesaria* la existencia de la Luna para el desarrollo de la vida inteligente?

El Planeta Doble

Los textos de astronomía nos dicen que el Sistema Solar contiene nueve planetas, pero este número halaga al "planeta" más lejano, Plutón. La masa combinada de Plutón y su satélite Caronte es diminuta: menos del 5% de la masa del siguiente planeta más pequeño, Mercurio. Un objeto tan débil puede ser mejor considerado como un cometa extremadamente grande que ha perdido mucho de su hielo. Aunque los intentos de rebajar el estatus de Plutón han fracasado —quizás por razones de sentimiento y tradición— muchos científicos planetarios consideran que el sistema solar contiene sólo ocho planetas. Si hacemos lo mismo, y excluimos el sistema Plutón-Caronte de la lista de planetas, entonces la Tierra es única en tener un satélite excepcionalmente grande.

Nótese que la Luna no es el satélite más grande del Sistema Solar. Ese honor pertenece a Ganimedes, que es una de las lunas de Júpiter. Otros dos satélites jovianos —Calisto e Io— también son ligeramente más grandes que la Luna; y también lo es Titán (una de las lunas de Saturno). Pero Ganimedes, Calisto, Io y Titán orbitan planetas gigantes. Comparados con sus cuerpos padres, estos satélites son como granos de polvo. Nuestra Luna, por otro lado, es grande comparada con la Tierra: tiene 1/81 de la masa de nuestro planeta. El sistema Tierra-Luna ha sido llamado, con razón, un "planeta doble". Y los planetas dobles pueden ser raros.

FIGURA 57 Plutón y Caronte combinados tienen menos del 5% de la masa de Mercurio, el siguiente planeta

má

La Formación de la Luna

Para estimar la escasez de “planetas dobles”, necesitamos entender cómo se formó la Luna. Durante muchos años, la formación de la Luna fue uno de los problemas de larga data de la ciencia planetaria. Se propusieron tres mecanismos: la *co-acreción*, en la que la Tierra y la Luna se formaron al mismo tiempo a partir del gas y el polvo de la nebulosa solar; la *fisión*, en la que la Tierra se formó primero y giró con tanta rapidez un gran trozo de material que se desprendió y formó la Luna; y la *captura*, en la que los dos objetos se formaron en diferentes lugares de la nebulosa solar, y luego la Luna quedó atrapada en órbita después de desviarse demasiado cerca de la Tierra. Los tres mecanismos tenían dificultades para explicar varias características importantes del sistema Tierra-Luna, pero se esperaba que el análisis de las rocas lunares traídas de las misiones Apolo justificara una de ellas. En cambio, quedó claro que ninguna de estas ideas funcionaba. Se necesitaba una nueva teoría de la formación lunar.

En 1975, dos grupos de científicos estadounidenses propusieron de forma independiente la hipótesis de *impacto* para el origen de la Luna.[211] Postularon que un objeto con la masa de Marte golpeó la Tierra primigenia en un impacto descentrado. La inimaginablemente violenta colisión expulsó una mezcla de material terrestre e impactante en órbita alrededor de la Tierra, y este material rápidamente se fusionó para formar la Luna.

FIG *ista en la*
Lu

Ahora, a los científicos generalmente no les gusta tener que recurrir a eventos cataclísmicos o únicos para explicar sus observaciones, pero al menos en este caso los modelos computarizados pueden simular posibles colisiones de formación lunar. Aunque los detalles del impacto todavía están en disputa — por ejemplo, trabajos recientes sugieren que el impactador puede haber sido más masivo de lo que se pensaba — la hipótesis explica muchos de los hechos observados sobre el sistema Tierra-Luna. Además, hay otra evidencia (de las inclinaciones de los planetas, por ejemplo) de que las colisiones violentas no eran infrecuentes en el Sistema Solar temprano. La hipótesis del

impacto ha ganado una gran medida de consenso entre los científicos planetarios.

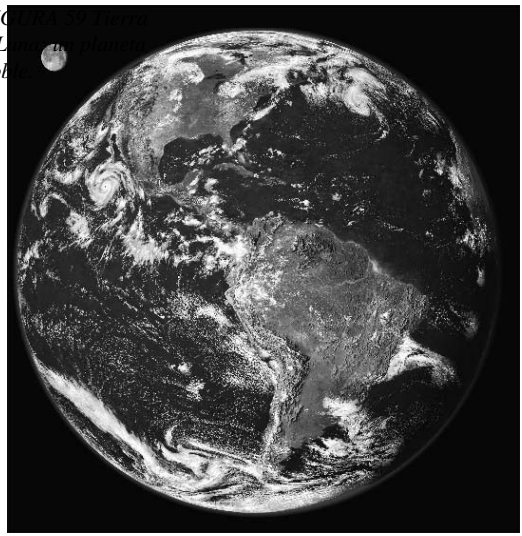


FIGURA 39 Tierra y Luna: un planeta doble.

Si nuestra Luna fue de hecho la consecuencia de un impacto gigantesco, entonces la singularidad del doble planeta Tierra-Luna dentro de nuestro Sistema Solar no tiene por qué sorprendernos. Aunque las colisiones con objetos del Sistema Solar eran comunes, tales colisiones cataclísmicas que formaban la Luna pueden haber sido escasas; quizás los infantes Mercurio, Venus y Marte fueron simplemente lo suficientemente afortunados como para esquivar los proyectiles más grandes. (Se ha sugerido que Venus tuvo una vez un gran satélite, que se formó de la misma manera que la Luna, pero que siguió una órbita retrógrada: en otras palabras, orbitó Venus en la dirección "incorrecta". Tal órbita podría ciertamente ocurrir si el satélite fuera creado a través de un evento de impacto. Sin embargo, mientras que las fuerzas de las mareas están causando que nuestra Luna se aleje de la Tierra, en el caso de una órbita retrógrada esas fuerzas actuarían en la dirección opuesta. Un satélite en órbita retrógrada se mueve hacia el planeta y finalmente es destruido. Este es el destino de Tritón, el mayor de los satélites de Neptuno. Además, la colisión que forma la Luna ocurrió en un momento crítico. Si hubiera ocurrido mucho antes, cuando la Tierra era menos masiva, entonces la mayoría de los escombros de la colisión habrían terminado en el espacio, y la Luna habría sido mucho más pequeña de lo que es. Si hubiera ocurrido mucho más tarde, entonces la Tierra habría sido más masiva, y su mayor gravedad superficial habría evitado la eyección de suficiente masa para formar una gran Luna.

Mientras que los escenarios originales para la formación lunar implicaban que nuestra Luna era casi un subproducto natural de la formación planetaria, la hipótesis de impacto sugiere que el sistema Tierra-Luna puede ser excepcional. Imaginen una colección de nebulosas estelares primordiales,

cada una idéntica a la nebulosa a partir de la cual se formó nuestro Sistema Solar. Tal vez sólo 1 de cada 10, o 1 de cada 100, o 1 de cada 1000, generaría un planeta similar a la Tierra con una Luna tan grande como la nuestra. Tal vez la cifra sea 1 en 1.000.000. No tenemos idea — y se necesitarán grandes avances en astronomía observacional antes de que descubramos si los planetas terrestres extrasolares poseen satélites tan grandes como nuestra Luna. Con nuestro conocimiento actual, sin embargo, es totalmente posible que la Tierra sea inusual en la posesión de un satélite tan grande.

La Influencia Lunar

Incluso si la Luna es rara, ¿y qué? Si la Tierra no tuviera luna, entonces los poetas a través de los tiempos habrían perdido una fuente de inspiración. Tal vez el desarrollo científico de la humanidad se habría visto afectado, ya que históricamente la Luna ha jugado un papel importante en el avance de nuestra comprensión de la astronomía. ¿Pero podría la vida misma haber sido diferente?[212]

Hay varias maneras en que la Luna ejerció (o continúa ejerciendo) una influencia sobre la Tierra. Por ejemplo, la Luna eleva las mareas oceánicas. Poco después de que se formó la Luna estaba mucho más cerca de la Tierra de lo que está ahora, por lo que las mareas de hace 4 mil millones de años habrían sido enormes — un paraíso para los surfistas. Se ha sugerido que las mareas fueron un factor en el comienzo de la vida, quizás actuando como un mezclador gigante de la sopa primordial y causando piscinas ricas en nutrientes donde la vida pudo haber comenzado. Esta sugerencia no es del todo convincente, porque incluso sin la Luna todavía tendríamos mareas oceánicas: el Sol levanta mareas aproximadamente la mitad de grandes que las mareas lunares actuales. Sin embargo, nos perderíamos las mareas de primavera y de otoño, que dependen de las posiciones relativas del Sol y la Luna. Por lo tanto, no se puede descartar esta sugerencia.

FIG montaje de la Tierra y la Luna (la Luna se mu ativamente más grande aquí que en la realidad)

Un efecto de marea lunar más sutil es su influencia sobre la corteza terrestre. El efecto de la gravedad de la Luna *puede* haber amplificado la actividad volcánica en la Tierra y aumentado la deriva continental. Así que es posible (aunque no seguro) que una Tierra sin Luna hubiera sido menos activa geológicamente; la atmósfera de la Tierra, que se formó por la emisión de gases volcánicos, puede haber tardado mucho más tiempo en alcanzar la etapa en la que la vida podría surgir. Discutimos la importancia de la tectónica de placas en la sección anterior.

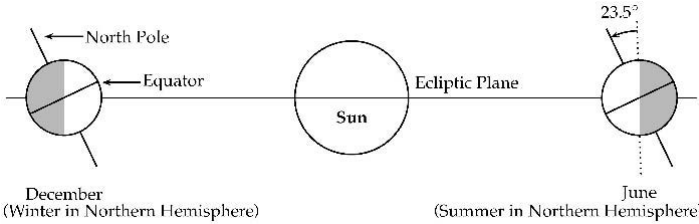


FIGURA 61 Es la oblicuidad de la Tierra — su inclinación relativa al plano de su órbita alrededor del Sol (el plano eclíptico) — lo que produce las estaciones. Para los planetas con una oblicuidad "moderada" como la Tierra, la mayor parte de la energía solar cae en las regiones ecuatoriales, donde el Sol del mediodía siempre está alto en el cielo. Las regiones polares están en constante iluminación durante 6 meses, pero también en constante oscuridad durante 6 meses; incluso cuando el Sol está en el cielo, nunca es más alto en el cielo de lo que la oblicuidad permite — 23,5 ◦ en el caso de la Tierra — por lo que el suelo nunca se calienta realmente fuerte por la luz solar. Así, las regiones polares son frías y las regiones ecuatoriales son calientes (La figura no está a escala.).

El efecto más importante a considerar, sin embargo, es cómo la Luna influye en la *oblicuidad* de la Tierra. Todos los planetas orbitan el Sol en o cerca de un plano en el espacio; la oblicuidad — o inclinación axial — de un planeta es el ángulo de inclinación de su ecuador a este plano orbital. La inclinación de la Tierra de 23,5° da lugar a las agradables estaciones que disfrutamos. Otros planetas no tienen tanta suerte. Mercurio tiene una oblicuidad de 0°, por lo que sus regiones ecuatoriales se asemejan al infierno. La vida tal como la conocemos no podría sobrevivir. (Curiosamente, un observador en cualquiera de los polos de Mercurio vería al Sol siempre en el horizonte. Relativamente poca energía solar puede ser absorbida en los polos, y de hecho las regiones polares de Mercurio están cubiertas de hielo. Urano, que tiene una oblicuidad de 98°, está casi acostado de lado. Un polo recibe la luz del sol durante la mitad del año uranio, mientras que el otro polo está en la oscuridad. Una vez más, estas son condiciones menos que ideales para la vida. La Tierra — desde nuestro sesgado punto de vista — parece ser "perfecta".

El evento de impacto que formó la Luna habría causado que el eje de rotación de la Tierra cambiara de su posición inicial. Y lo que es más importante, como han demostrado las simulaciones por ordenador, la Luna desempeña un papel importante en la estabilización de la inclinación axial de la Tierra durante un período de muchos millones de años. Esto es importante porque incluso pequeños cambios en la oblicuidad pueden causar cambios dramáticos en el clima planetario. Por ejemplo, la oblicuidad de la Tierra oscila alrededor de ±1,5° con un período de oscilación de 41.000 años. Esta es sólo una pequeña variación, pero parece estar ligada a la sucesión de edades de hielo que la Tierra ha experimentado en los últimos millones de años. Marte no tiene ninguna influencia estabilizadora sobre su oblicuidad (Fobos y Deimos son simplemente rocas, con masa insuficiente para tener alguna influencia). La oblicuidad de Marte es actualmente de 25°, pero este valor oscila entre 15° y 35°, con un período de 100.000 años. Los cálculos indican que, en escalas de tiempo más largas, la oblicuidad de Marte cambia caóticamente: en los últimos 10 millones de años puede haber oscilado entre

0° y 60°. Sin una Luna que actúe como una influencia estabilizadora, la oblicuidad de la Tierra también se desviaría caóticamente, a valores de hasta 90°. Incluso un satélite relativamente grande —hasta la mitad de la masa de nuestra Luna— sería incapaz de estabilizar la oblicuidad; la Tierra requiere un satélite grande para evitar que su oblicuidad se desplace y su clima cambie de un extremo a otro.

La vida en la Tierra se ha adaptado bien al cambio climático en el pasado, pero si el patrón marciano de cambios oblicuos se hubiera repetido aquí, es difícil ver cómo podrían haber prosperado los animales terrestres avanzados. Tal vez la vida en la Tierra no habría evolucionado hacia las formas que vemos hoy en día.

* * *

Hay muchos "si", "pero" y "tal vez" en la discusión anterior. No sabemos si un gran satélite es *necesario* para que un planeta sea un hogar adecuado para formas de vida complejas. Nuestra propia opinión es necesariamente sesgada. Creemos que la Luna ha sido beneficiosa para el desarrollo de la vida aquí, pero no sabemos si la Luna era necesaria para la vida. Tal vez si viviéramos en un mundo sin luna estaríamos agradecidos de no tener uno de esos enormes pedazos de roca colgando tan cerca de nosotros en el cielo.

Y sin embargo, esa persistente sospecha permanece. Quizás los planetas dobles como nuestro sistema Tierra-Luna *son* necesarios para la vida, y sin embargo parecen formarse en raros eventos fortuitos. Quizás la singularidad de nuestro satélite explica por qué estamos solos. Tal vez esa sea la tragedia de la Luna.

SOLUCIÓN 43: LA GÉNESIS DE LA VIDA ES RARA

La solución del problema de la vida se ve en la desaparición del problema.

Ludwig Wittgenstein,
Tractatus Logico-Philosophicus

La respuesta de Hart a la pregunta de Fermi es que la génesis de la vida es casi milagrosamente rara. Por razones prácticas, estamos solos: La Tierra posee la única vida inteligente —la única *vida*— en la parte visible de un Universo infinito.

Este milagro pierde parte de su brillo en un Universo infinito: un número infinito de planetas poseen formas de vida inteligentes. Sin embargo, mucha gente encuentra difícil tener en cuenta la noción de un Universo infinito con un número infinito de planetas habitables. ¿No podemos aceptar *parte* de la idea de Hart? Podemos prescindir de la noción astronómica de un Universo infinito y argumentar únicamente a partir de la biología: tal vez la vida no es un milagro, pero sin embargo surge sólo en raras ocasiones. Tal vez el Universo parece estéril porque — con la excepción de una o dos islas de vida como la Tierra — ¿*es* estéril?

Como es habitual en cualquier aspecto de la paradoja de Fermi, hay dos opiniones diametralmente opuestas. Un grupo argumenta que la vida es realmente difícil de crear para la Naturaleza. El otro sostiene que es casi seguro que la vida aparezca en un planeta tan pronto como las condiciones lo permitan. Para discutir los méritos de ambas posiciones, primero tenemos que tomar un largo desvío y considerar la cuestión de lo que entendemos por vida y cómo la vida podría haber surgido.

* * *

En la escuela, mi maestro siempre podía hacer agujeros a través de los intentos de nuestra clase de ciencias para proporcionar una definición de la vida. Señaló que, según algunas de nuestras definiciones, el fuego está vivo (ya que crece, se reproduce, etc.). Por otro lado, según nuestras definiciones, una mula no está viva (ya que no puede reproducirse a sí misma). Para los propósitos de esta sección intentaré presentar otra definición de la vida terrestre. Mi viejo maestro probablemente todavía podría hacer agujeros en la definición, y en cualquier caso la definición podría ser inapropiada en el futuro. (En diez años, tal vez, los científicos podrían desarrollar una computadora consciente de sí mismos. ¿La computadora estará viva? O dentro de un siglo, tal vez, un explorador de la misión Altair descubra un cristal rosado de mal olor que todas las mañanas se convierte en una sustancia viscosa que se aferra a los costados de la nave espacial y se come el metal.

¿La sustancia viscosa está viva? En ambos casos, según mi definición, la respuesta es "no", aunque la respuesta probablemente debería ser "sí". Tenemos que empezar por alguna parte, sin embargo, y la definición que se da a continuación es tan buena como cualquier otro lugar.

Yo defino algo para estar vivo si tiene las siguientes cuatro propiedades.

Primero, *un objeto vivo debe estar hecho de células*. Cada criatura viviente en la Tierra consiste de una sola célula o de una colección de células. Si supiéramos cómo se originaron las células, entonces bien podríamos entender cómo se originó la vida misma.

Hay dos tipos muy diferentes de células: *procariotas* y *eucariotas*. Las células procariotas carecen de un núcleo central. Son simples, pequeños y existen en una variedad de tipos. Los organismos procariotas son enormemente exitosos, en gran medida porque su simplicidad significa que pueden reproducirse rápidamente. Un descubrimiento reciente y profundo es que hay dos tipos muy diferentes de procariotas:[213] eubacterias — o bacterias "verdaderas" (o, como escribiré para simplificar, sólo bacterias) — y archaea. Los dos tipos de células procarióticas no parecen tener una relación más estrecha entre sí que con las células eucariotas. Las células eucariotas son mucho más complicadas que las células procarióticas; dentro de una membrana externa se encuentra un formidable conjunto de maquinaria bioquímica y un núcleo encerrado dentro de sus propias membranas nucleares. Esta complejidad requiere que las células eucariotas posean típicamente 10.000 veces más volumen que las células procarióticas. Los eucariotas son capaces de ensamblarse para formar organismos complejos y multicelulares — plantas, hongos y animales.

Segundo, *un objeto vivo debe tener un metabolismo*. El metabolismo es lo que llamamos la variedad de procesos que permiten que una célula, o una colección de células, absorba energía y materiales, los convierta para sus propios fines y excrete productos de desecho. En otras palabras, todos los organismos vivos requieren alimentos de alguna descripción, y todos los organismos vivos crean desechos. (El fuego tiene un metabolismo, como diría mi antiguo profesor de ciencias, pero no tenemos que considerar el fuego como algo vivo, ya que no cumple todos los demás criterios). El metabolismo tiene lugar a través de la acción catalítica de las *enzimas*: sin enzimas, las diversas reacciones bioquímicas que tienen lugar en las células simplemente no ocurrirían. A su vez, las enzimas están hechas de *proteínas*. Por lo tanto, las proteínas son un componente vital de la vida, al menos aquí en la Tierra. Como veremos más adelante, las instrucciones para crear las diversas proteínas necesarias para la existencia de una célula están contenidas en su ácido desoxirribonucleico (ADN), mientras que la maquinaria bioquímica de síntesis de proteínas se basa en su ácido ribonucleico (ARN). En forma abreviada: El ADN hace que el ARN produzca proteínas.

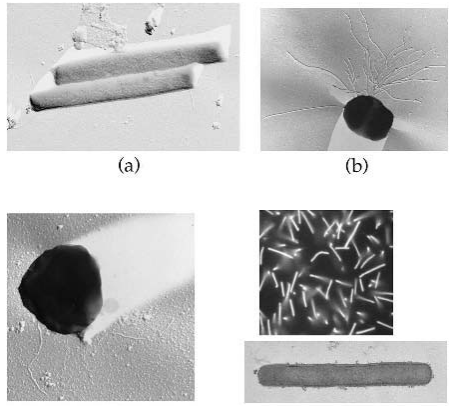


FIGURA 62 Cuatro tipos diferentes de archaea. a) Thermoproteus tenax. *Las especies del género* Thermoproteus *crecen a 78-96°C, utilizan el hidrógeno como fuente de energía y el* CO_2 *como fuente de carbono. b)* Pyrococcus furiosus. *"Pyrococcus" significa "bola de fuego" — una referencia tanto a su forma como a las altas temperaturas a las que prospera; "furiosus" significa "correr" — puede duplicar rápidamente su número. c)* Methanococcoccus igneus. *Algunas especies crecen a 85°C y presionan más de 200 atm; el oxígeno es un veneno. d)* Methanopyrus kandleri. *Se encuentran en profundidades oceánicas de alta presión y pueden sobrevivir a 110°C. Así, dentro del mundo viviente hay tres dominios: archaea, bacteria y eukarya. Según esta definición, los virus y priones son inertes.*

En tercer lugar, *un objeto vivo puede reproducirse*, o bien deriva de objetos que podrían reproducirse. Las células pueden reproducirse individualmente o en parejas sexuales, y el mecanismo de reproducción es el ADN. Claramente, entonces, el ADN juega un papel central en los organismos vivos — justo a lo central que llegaremos en breve. (Las estructuras cristalinas pueden reproducirse; sin embargo, carecen de la variación que ocurre cuando los organismos vivos se reproducen. Replicación, en lugar de reproducción, es un mejor término para el crecimiento cristalino, y ciertamente no necesitamos considerar que los cristales están vivos. Por otro lado, las mulas y otros organismos estériles provienen de criaturas que *pueden* reproducirse; no necesitamos clasificar a las mulas como no vivas.

Cuarto, *la vida evoluciona*. La evolución darwiniana — selección natural que actúa sobre la variación hereditaria — es un aspecto clave de la vida.

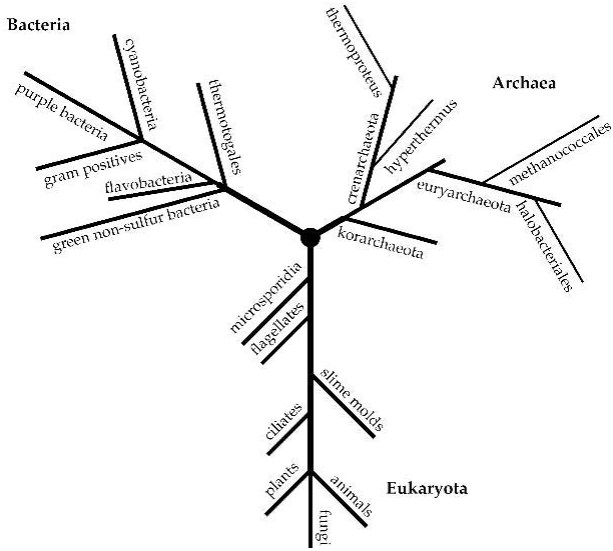


FIGURA 63 Un bosquejo muy simplificado del árbol de la vida. El árbol contiene tres dominios: archaea, bacterias y eukarya. El dominio de archaea contiene tres reinos: korarchaeota, crenarchaeota y euryarchaeota; el dominio de eukarya contiene, entre otros, los reinos familiares de animales y plantas. Las relaciones entre los tres dominios son controvertidas, y el diagrama no debe tomarse demasiado en serio — excepto que muestra que la vida en la Tierra posee una tremenda unidad.

Estas cuatro propiedades —las células, el metabolismo, la reproducción y la evolución— son suficientes para basar una discusión sobre la vida, incluso si la definición misma pudiera mejorarse. Ahora estamos en condiciones de preguntarnos: ¿cómo empezó la vida?

* * *

Vale la pena decir desde el principio que *nadie sabe* cómo empezó la vida. Sin embargo, en los últimos años se han hecho enormes progresos en dos direcciones: por un lado, rastrear los ancestros de la vida en la medida de lo posible y, por otro, tratar de comprender las vías químicas que podrían haber conducido a las primeras formas de vida. (Hay por lo menos otro enfoque prometedor: la idea de que la vida surgió compleja y completa gracias a las propiedades auto-organizativas de los sistemas químicos. La falta de espacio nos impide discutir este enfoque).[214]

El método "de arriba hacia abajo" para buscar el origen de la vida es la búsqueda de UACU — el Último Ancestro Común Universal, del cual toda la vida presente debe haber heredado sus estructuras bioquímicas comunes. (Hay una tremenda unidad de vida terrestre: todos los organismos, con unas pocas excepciones menores, usan el mismo código genético, lo que permite que una secuencia de ADN especifique un polipéptido; todos los organismos usan ADN para transportar información genética; y así sucesivamente. Si UACU fuera lo suficientemente simple, si existiera en una etapa muy temprana de la historia de la Tierra — y si pudiéramos entender a UACU en detalle — entonces podríamos deducir cómo llegó a ser. Lamentablemente, este enfoque

sólo puede adoptarse hasta cierto punto. Una imagen común es que UACU ya era un organismo sofisticado, que había evolucionado considerablemente desde el momento en que surgió la vida, antes de que se ramificara en los dominios de las archaea y las bacterias. Más tarde, en esta imagen, el dominio eucariota se separó de las archaea. Este panorama ya es bastante complicado, pero a medida que los laboratorios bioquímicos descubren nueva información casi a diario, el panorama se vuelve aún más enrevesado. Por lo general, pensamos que la información genética sólo se transmite verticalmente, de padres a hijos. Al principio de la historia de la vida, sin embargo, la transferencia *horizontal* de genes entre diferentes tipos de organismos parece haber ocurrido con frecuencia. Esta transferencia horizontal de información genética significa que los linajes simples se enredan. En el momento en que se supone que UACU existió, puede haber existido un pool de genes (formado por una comunidad de células que fueron capaces de intercambiar genes de forma horizontal porque compartían el mismo código genético), de los cuales los tres dominios surgieron por separado. En otras palabras, las archaea, bacterias y eucariotas pueden ser igualmente antiguas. (Por otro lado, hay una sugerencia de que el evento de la Superglaciación de hace 2.500 millones de años produjo las condiciones que dieron origen a la célula eucariota). En otras palabras, las eucariotas pueden ser relativamente reciente; y sin el evento de la Superglaciación de la Tierra ellas nunca podrían haber surgido. Estas interesantes sugerencias siguen siendo un área de investigación activa.

En lugar de empantanarnos en los detalles de UACU, podemos considerar el enfoque "ascendente" de la cuestión del origen de la vida. Podemos preguntarnos: ¿cómo llegaron a existir los químicos universales de la vida —ácidos nucleicos y proteínas—? Si podemos entenderlo, entonces podremos llenar el vacío entre los enfoques de abajo hacia arriba y de arriba hacia abajo; podremos entender cómo la materia inanimada cobró vida.

Ácidos Nucleicos

Si alguna molécula merece el título de "molécula de la vida", seguramente debe ser ácido desoxirribonucleico — ADN. Según la definición presentada anteriormente, la vida tiene dos aspectos clave: tiene un metabolismo y transmite información a través del proceso reproductivo. La molécula de ADN es central en ambos aspectos. El papel que desempeña en la síntesis de proteínas, que a su vez permiten el metabolismo, se describe a continuación. Aquí nos concentramos en el aspecto reproductivo y consideramos brevemente cómo el ADN puede replicarse a sí mismo — al mismo tiempo que proporciona suficiente variación sobre la cual la selección natural puede funcionar.[215]

FIGURA 64 Una hélice doble (como el ADN) como se muestra aquí en una figura generada por computadora.

La molécula de ADN es un polímero de nucleótidos. Un nucleótido consta de tres partes.

Primero, posee un azúcar desoxirribosa. El azúcar contiene cinco átomos de carbono, numerados convencionalmente con primos del 1º al 5º (pronunciados "un primo", "dos primos", y así sucesivamente). El azúcar es similar a la ribosa, pero carece de una molécula de hidroxilo en la 2ª posición.

En segundo lugar, posee un grupo de fosfato. Los nucleótidos pueden unirse para formar largas cadenas a través de los llamados enlaces de éster de fosfato — enlaces entre el grupo de fosfato de un nucleótido y el componente de azúcar del siguiente nucleótido. Las cadenas de azúcar-fosfato forman la columna vertebral del ADN; en la imagen familiar del ADN como una molécula "parecida a una escalera", las cadenas de azúcar-fosfato forman los "rieles" de la escalera. Una cadena puede alargarse indefinidamente simplemente uniendo más nucleótidos a través de más enlaces de ésteres; una molécula de ADN puede tener entre 100 y unos pocos millones de nucleótidos de longitud. No importa cuán larga sea la cadena, siempre hay dos extremos. Un extremo tiene un grupo −OH libre en el carbono 3º (el extremo 3º) y el otro extremo tiene un grupo de ácido fosfórico en el carbono 5º (el extremo 5º).

Tercero, posee un par de bases nitrogenadas. Estos forman los "escalones" de la escalera del ADN. Una base está ligada al azúcar desoxirribosa en el 1º carbono. Una base puede ser una de las purinas, adenina (A) o guanina (G), o una de las pirimidinas, citosina (C) o timina (T). Los bioquímicos presentan la secuencia de nucleótidos en una cadena comenzando por el 5º extremo e identificando las bases en el orden en que están ligadas; una secuencia típica de ADN puede escribirse como —G−C−T−T−T−A−G−G-.

Uno de los desarrollos clave en la ciencia fue la comprensión de que el ADN en el material nuclear de las células tiene dos hebras, retorcidas una alrededor de la otra para formar una doble hélice, de manera que una hebra siempre está asociada a una hebra complementaria. La base G está siempre opuesta a la base C, la base T está siempre opuesta a la base A. Esta complementariedad ocurre porque sólo estas combinaciones de pares de bases pueden formar enlaces de hidrógeno entre ellas y mantener juntas las dos hebras. Un enlace de hidrógeno individual es débil, pero una molécula de ADN normal contiene tantos pares de bases que las dos hebras se mantienen estrechamente unidas. Esta complementariedad también significa que toda la

información se encuentra en una sola cadena de ADN — y permite la posibilidad de replicación y reproducción.

FIG[illegible]ertebral de una molécula de [illegible]ADN[illegible] cadenas de grupos de azu[illegible]fato; las bases nit[illegible]e forman enlaces, pero deb[illegible]os de emparejamiento: ad[illegible]itosina frente a guanina.

El proceso de replicación del ADN comienza cuando una enzima llamada DNA-helicasa abre parcialmente la doble hélice en una región conocida como la *horquilla de replicación*. En la bifurcación de replicación hay dos hebras de ADN — una de las cuales es la *hebra plantilla*. Con las bases ahora expuestas, una enzima llamada ADN— polimerasa se mueve a su posición y comienza la síntesis de una cadena de ADN complementaria a la plantilla. La enzima lee la secuencia de bases en la hebra plantilla, en la dirección desde el 3º extremo hasta el 5º extremo, y agrega los nucleótidos a la hebra complementaria uno a la vez — siempre G a C y A a T. (Así que una secuencia en la hebra de la plantilla de −G−C−T−T−A−G−G−G− se convertiría en −C−G−A−A−T−T−C−C−C− en la hebra complementaria sintetizada, que crece en la dirección de 5º a 3º). Eventualmente, se forma una hebra complementaria completa; la ADN-polimerasa cataliza la formación de los enlaces de hidrógeno entre los nucleótidos en las dos hebras, y se puede formar una nueva doble hélice. Mientras todo este proceso tiene lugar, un proceso bastante más complicado fabrica una nueva hebra que es complementaria a la otra hebra original (o *hebra rezagada*). El resultado neto es la creación de dos copias idénticas de la doble hélice de ADN original, y cada nueva hélice contiene una hebra del original. Tenemos un mecanismo de replicación.

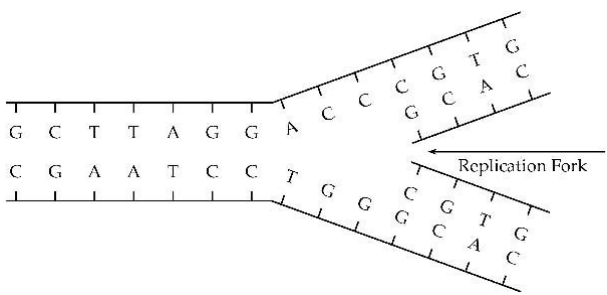


FIGURA 66 El emparejamiento específico de bases nucleótidas —A con T , C con G — permite que el ADN se replique; es la base de la herencia. Cuando la molécula de ADN de cadena doble se replica, las dos cadenas se separan en la horquilla de replicación. A continuación, las enzimas añaden nuevas bases a las dos cadenas y siguen las reglas de emparejamiento. El resultado son dos moléculas, ambas idénticas a la original.

(El proceso descrito anteriormente es una versión simplificada de lo que realmente ocurre. Uno de los aspectos que omití es el papel que juega el ARN en la replicación del ADN. El ácido ribonucleico es el otro tipo principal de

ácido nucleico y también cumple funciones clave para la vida en la Tierra. Hay varias diferencias entre el ADN y el ARN. Una diferencia *estructural* es que el ARN generalmente aparece en las células como una sola cadena de nucleótidos, en lugar de como una doble hélice de ADN; las moléculas de ARN también son típicamente más pequeñas que las moléculas de ADN. Hay dos diferencias químicas entre las moléculas. Primero, los nucleótidos de ARN contienen el azúcar ribosa en lugar de la desoxirribosa (de ahí la diferencia de nombres entre las dos moléculas). Segundo, el ARN emplea la base uracilo (U) en lugar de la timina. También hay una gran diferencia *funcional* entre los dos ácidos: El ADN existe únicamente para almacenar información genética en la secuencia de sus bases nucleótidas, mientras que las moléculas de ARN *hacen* cosas. Hay varios tipos de ARN, cada uno realizando diferentes tareas, y nos encontraremos con tres de ellos — ARN mensajero (ARNm), ARN ribosomal (ARNr) y ARN de transferencia (ARNt) — más abajo.

La capacidad del ADN para replicarse es el secreto de la capacidad de la vida para reproducirse. Esta habilidad explica por qué la descendencia se parece a sus padres — las serpientes engendran serpientes, los pájaros carpinteros engendran pájaros carpinteros, y los humanos engendran humanos. Pero para que la vida *evolucione*, y para que las especies se conviertan en otras especies, la herencia debe ser imperfecta. Debe haber alguna variación entre las crías: la selección natural no puede adaptar cosas que no varían. Afortunadamente, hay variación cuando el ADN se replica. De vez en cuando, ocurre una *mutación*: hay un cambio en la secuencia de bases nucleótidas. Estas mutaciones ocurren aleatoriamente por daño por radiación, por agentes químicos y simplemente por errores en el proceso de replicación del ADN. (La tasa de mutación es notablemente pequeña, debido a varias pruebas que tienen lugar cuando el ADN se replica. Después de la primera etapa de la replicación hay dos etapas de corrección de errores: *corrección de pruebas* y *reparación de desajustes*. Estas etapas adicionales minimizan la tasa de error a 1 en 10^9.) Si ocurre un error en una parte del ADN que codifica una proteína (más sobre esto abajo), entonces el ADN mutado producirá una proteína diferente. Si la proteína realiza su trabajo previsto mejor que la original, entonces la mutación será beneficiosa para el organismo (y tal vez aumente la probabilidad de supervivencia del organismo y, por lo tanto, a través de un mayor número de descendientes, de su propia existencia continuada); pero lo más probable es que la mutación sea dañina o al menos neutra. El punto es que las mutaciones dan a la selección natural algo sobre lo que trabajar.

Si todo lo que los ácidos nucleicos hacían era replicarse, entonces serían sólo marginalmente más interesantes que los cristales auto-replicantes. Aunque el ADN puede almacenar información genética, sería de poca utilidad si la información no fuera recuperada y puesta en uso. Sería como tener una biblioteca pública llena de libros, pero sin que a nadie se le permita leer

ninguno de los volúmenes. Lo que hace que los ácidos nucleicos sean tan fascinantes es que codifican y construyen proteínas. Y las proteínas son las que hacen la vida tan interesante. Las proteínas permiten que la vida haga cosas.

Proteínas

Las proteínas son macromoléculas complicadas que exhiben una tremenda versatilidad. Funcionan como enzimas (que hacen posible el metabolismo de una célula), actúan como hormonas (por lo tanto, proporcionan una función reguladora; la insulina es un ejemplo común), y proporcionan estructura (nuestras uñas, cabello, músculos y los lentes en nuestros ojos son todas proteínas).

Una proteína es una larga secuencia de *aminoácidos* plegados en una estructura tridimensional. Una secuencia particular de aminoácidos se pliega en una estructura particular. Cambie la secuencia y cambie la forma en que la proteína se pliega — y por lo tanto la tarea que la proteína puede cumplir, ya que la tarea bioquímica que una proteína puede llevar a cabo depende críticamente de su forma en tres dimensiones. Las proteínas hacen uso de veinte aminoácidos diferentes. Hay muchos otros aminoácidos en la Naturaleza, y varios de ellos son importantes en la biología; pero las proteínas usan sólo veinte. Todos los aminoácidos tienen una estructura común: un grupo amino (H_2N), un residuo o grupo R (CHR) y un grupo carboxilo (COOH). La estructura general está escrita H2N−CHR−COOH, y la cadena se forma uniendo el extremo amino al extremo carboxilo mediante enlaces peptídicos. (Una cadena de aminoácidos se llama así un *polipéptido*; una proteína es simplemente uno o más polipéptidos. Lo que hace que cada aminoácido sea único es la cadena del lado R: diferentes aminoácidos tienen diferentes grupos R y por lo tanto poseen diferentes propiedades. Por ejemplo, algunas cadenas laterales crean un aminoácido que es hidrofóbico; tales aminoácidos tienden a agruparse en el interior de una proteína y por lo tanto juegan un papel en la determinación de la estructura tridimensional de la molécula. Otras cadenas laterales producen un aminoácido que es hidrófilo — en otras palabras, reacciona fácilmente con el agua.

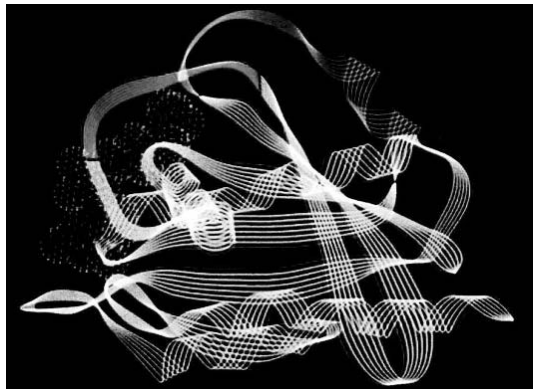


FIGURA 67 La proteína ras, que actúa como un interruptor molecular que gobierna el crecimiento celular. Conocer la estructura de esta proteína en tres dimensiones puede permitir a los científicos idear métodos para desactivar el interruptor en las células cancerosas. Sin embargo, calcular la forma en que se doblará una secuencia de aminoácidos es un problema extremadamente difícil

Cada aminoácido es codificado por un conjunto de tres bases de nucleótidos de ARN llamado codón. Puesto que hay cuatro bases (A, C, G, U) hay $4 \times 4 \times 4 = 64$ codones. En teoría, entonces, los codones podrían codificar 64 aminoácidos — y sin embargo sólo 20 aminoácidos diferentes son usados en la síntesis de proteínas. El *código genético* es, pues, degenerado: 3 de los codones representan un comando de "fin de cadena", y los otros 61 codones codifican los 20 aminoácidos. En otras palabras, casi todos los aminoácidos están codificados por varios codones. (Por ejemplo, el aminoácido cisteína es codificado por los codones UGU y UGC; la isoleucina es codificada por los codones UAU, UAC y UAA; y así sucesivamente. El código genético es esencialmente universal: con sólo pequeñas excepciones, todos los organismos de la Tierra lo utilizan. (¿La universalidad del código genético implica que es el único código posible? Tal vez había originalmente varios códigos diferentes, y este sólo sucedió para ganar a los demás. Pero si la singularidad actual del código significa que surgió sólo una vez en la historia de la vida, tal vez el desarrollo de un código efectivo represente una barrera difícil de superar para la evolución.

La manera en que una célula sintetiza una proteína es a la vez maravillosamente simple y maravillosamente intrincada. Una versión altamente simplificada del proceso procede de la siguiente manera.

La información sobre cómo construir proteínas — y por lo tanto un organismo — está contenida en el ADN del organismo. Primero, entonces, cuando una célula recibe una señal que le pide que produzca cierta proteína (y supongamos que la proteína es un polipéptido simple), la doble hélice del ADN se descompone en la región de la cadena de codificación. Esto es como la cadena de plantillas mencionada anteriormente y contiene información para esa proteína en particular. Una región del ADN que codifica para un polipéptido (o, más exactamente, que codifica para alguna forma de ARN) se conoce como gen.

Una copia de ARNm del gen se hace en un proceso de transcripción — así

llamado porque cada triplete en la cadena de ADN se transcribe en el codón correspondiente en el ARNm. El ARNm entonces se mueve del material nuclear al citoplasma de la célula, llevando consigo su información sobre las secuencias de aminoácidos. Dentro del citoplasma, los organellas llamados ribosomas toman el ARNm y utilizan la información contenida en la secuencia de codones para sintetizar la proteína, añadiendo aminoácidos a la cadena de crecimiento. Este proceso se llama traducción, ya que un ribosoma utiliza el código genético para traducir de la secuencia de codones a una secuencia de aminoácidos. Un ingrediente clave aquí es el ARNt — pequeñas moléculas, cada una de las cuales puede unirse sólo a un aminoácido en particular. Se requiere una serie de enzimas para catalizar el proceso de unión; cada enzima reconoce una molécula particular de ARNt y el aminoácido correspondiente.

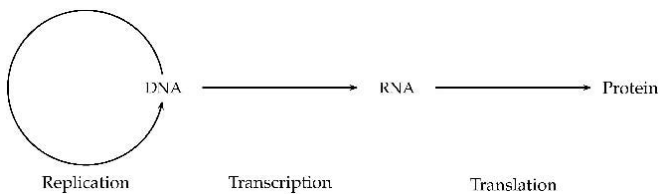


FIGURA 68 La molécula de ADN almacena información genética y la replica cuando una célula se divide. La expresión de esa información genética no tiene lugar directamente. En cambio, el ADN se transcribe primero en ARN. La información almacenada en el alfabeto de "cuatro letras" de los nucleótidos (el alfabeto utilizado por el ARN) se traduce entonces al alfabeto de "veinte letras" de los aminoácidos (que se utilizan para construir proteínas). El Dogma Central de la biología, primero declarado por Francis Crick, es que el flujo de información sigue la dirección de las flechas en este diagrama. En particular, el ARN puede sintetizar proteínas a través de la traducción, pero la traducción inversa nunca ocurre.

La síntesis de proteínas siempre comienza con la metionina (con el codón UAG) y continúa hasta que el ribosoma se encuentra con uno de los codones de parada (UAA, UAG o UGA), en cuyo momento la proteína es liberada y la síntesis ha terminado. (Esto proporciona un bosquejo de la síntesis de proteínas, al menos para las células procariotas. En las células eucariotas, el proceso se complica aún más por la presencia de secuencias de ADN que no codifican nada. Se requiere un paso más para eliminar esta información aparentemente inútil. El espacio aquí es demasiado limitado para ir más lejos en los detalles de la síntesis de proteínas, pero hay muchas fuentes excelentes disponibles para la lectura adicional,[216] y afortunadamente no necesitamos detalles adicionales para continuar la discusión.

Para recapitular: El ADN almacena información genética y la replica cuando una célula se divide. Eso es todo lo que hace. La tarea desordenada de expresar realmente la información se deja al ARN más versátil; usando el código genético universal, la información se transcribe del ADN al ARN y luego se traduce a la síntesis de proteínas.

¿Cómo surgieron los ingredientes de la vida?

Supongamos, por el momento, que los numerosos e intrincados pasos que van desde las primeras proteínas y los primeros ácidos nucleicos hasta UACU son, si no inevitables, al menos capaces de ser comprendidos mediante procesos físicos y químicos bien conocidos. Todavía nos queda la pregunta: ¿cómo nacieron las primeras proteínas y ácidos nucleicos? Si el paso de la química inorgánica al ADN y las proteínas es un fenómeno raro, entonces tenemos una resolución de la paradoja de Fermi. Porque sin estas grandes moléculas, la evolución no puede comenzar el paso a UACU y luego a la variedad de vida que vemos a nuestro alrededor. La vida, al menos tal como la conocemos, no puede existir.

Los componentes básicos de las macromoléculas vitales parecen ser fácilmente sintetizados. Encontramos aminoácidos, por ejemplo, tanto en el espacio interestelar[217] como en experimentos que intentan imitar la química de la Tierra primitiva.[218] En 1953, Stanley Miller realizó un experimento clásico en el que pasó una descarga eléctrica a través de un recipiente que contenía una mezcla de agua, metano y amoníaco. El experimento tenía por objeto investigar los efectos de las corrientes eléctricas que pasaban a través de la atmósfera de la Tierra primitiva. Al final de su experimento, Miller encontró muchos compuestos orgánicos en el recipiente. Otros científicos han estado en desacuerdo con la elección de Miller de una atmósfera modelo, pero los resultados fueron indiscutiblemente dramáticos. Parece probable que los aminoácidos podrían haberse formado en la Tierra poco después de que nuestro planeta se enfriara; los aminoácidos son casi una inevitabilidad de la química orgánica y las maravillosas propiedades asociativas del carbono. Del mismo modo, los azúcares, las purinas y las pirimidinas —los componentes a partir de los cuales se desarrollan los ácidos nucleicos— pueden formarse en experimentos del tipo Miller (aunque hay que admitir que los rendimientos son a menudo bajos).

Aunque aún no se han determinado los detalles, no es necesario suponer que los componentes químicos básicos necesarios para la vida son de ninguna manera excepcionalmente raros. Sin embargo, podemos tener menos confianza en la probabilidad de que los procesos naturales vinculen con éxito estos componentes a las moléculas de la vida: ácidos nucleicos y proteínas. De hecho, es en este punto que muchos creacionistas (y algunos científicos) afirman que la vida en la Tierra es única: argumentan que la probabilidad de procesos aleatorios que crean un ácido nucleico o una proteína es minúscula.

Considere, por ejemplo, la albúmina sérica (una proteína de tamaño promedio producida en el hígado y secretada en el torrente sanguíneo, donde realiza varias tareas necesarias). La albúmina sérica contiene una cadena de 584 aminoácidos, que se enroscan en una esfera. En nuestros cuerpos, la síntesis de la molécula está bajo la dirección de los ácidos nucleicos. Pero imagina un tiempo antes de que existiera el ADN, de modo que una molécula de albúmina sérica tuviera que ser sintetizada añadiendo un aminoácido al azar al final de una cadena de crecimiento. Las posibilidades de que los

procesos aleatorios produzcan la proteína son insignificantes (sólo 1 en 20^{584}). De manera similar, el "ADN génesis" — una cadena primitiva de nucleótidos que algunos científicos proponen como necesaria para el inicio de la vida — tiene una baja probabilidad de ser creada por el azar.[219]

La fabricación de una proteína a través de procesos aleatorios

Dado que hay 20 aminoácidos de los cuales elegir, en cada paso la probabilidad de que el aminoácido correcto es elegido para añadir al final de una cadena de crecimiento es de 1 en 20. Por lo tanto, para la albúmina sérica, que tiene 584 aminoácidos, la probabilidad de que cada aminoácido sea elegido en el orden correcto es de 1 en 20^{584} — que es lo mismo que 1 en 10^{760}. Esta es una probabilidad increíblemente pequeña. Esencialmente, no hay ninguna posibilidad de que esta proteína pueda ser sintetizada por un proceso tan aleatorio. Incluso una pequeña proteína como el citocromo *c*, que consiste en poco más de 100 aminoácidos, tiene sólo una probabilidad de 1 en 10^{130} de ser sintetizada al azar. Una vez más, por razones prácticas, este número es indistinguible de cero.

El comienzo de la vida parece sufrir una paradoja de "huevo y gallina": el ADN contiene las instrucciones necesarias para el ensamblaje de los aminoácidos en proteínas, pero cada molécula de ADN requiere la ayuda de enzimas (en otras palabras, proteínas) para existir. El ADN hace proteínas hace que el ADN haga proteínas. ¿Cuál fue primero?

Aunque estas críticas parecen ser fatales para la afirmación de que la vida surgió por casualidad, los bioquímicos han hecho grandes progresos en los últimos años para contrarrestarlas. Los detalles aún no están completos, pero no hay razón para suponer que los problemas son insuperables. Comience con los argumentos combinatorios contra la síntesis primordial de proteínas. De hecho, esencialmente no hay ninguna posibilidad de que el citocromo *c*, por ejemplo, se reúna de algún modo por accidente. Pero si permitimos un período de evolución molecular prebiótica, entonces las proteínas podrían sintetizarse a través del azar.

Por ejemplo, imagínese un lago en algún lugar de la todavía joven Tierra. Supongamos que en este lago sólo hay 10 aminoácidos diferentes capaces de formar péptidos; y supongamos que un péptido con una longitud de 20 aminoácidos mostró alguna función catalítica siendo favorecido por la selección natural. Entonces, la naturaleza sólo necesitaba probar 10^{20} combinaciones para atacar este péptido — aún un número enorme, pero un número que se podía acomodar cómodamente en las escalas de tiempo disponibles. Una vez que el péptido fue creado, la selección natural aseguraría que la cantidad de péptido en el lago aumentara en volumen. Supongamos que 1000 péptidos "útiles" diferentes, cada uno de 20 aminoácidos de longitud, fueron creados en el lago. Si dos de estos péptidos pudieran unirse para

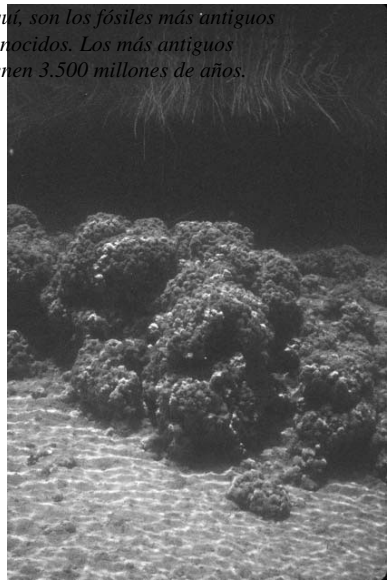
formar una sola cadena, entonces se podrían formar 1 millón de péptidos diferentes con una longitud de 40 aminoácidos. Una vez más, la naturaleza tendría mucho tiempo para probar todas las combinaciones. De la misma manera, se podían sintetizar péptidos que contenían 60 aminoácidos, y 80, y 100... en resumen, *había* tiempo para que surgieran proteínas en ese antiguo lago. Y había muchos millones de lagos en la Tierra primitiva. (Las proteínas particulares que surgieron seguramente habrían sido un accidente histórico. Reproducir la cinta de la historia, y las proteínas que usamos podrían ser muy diferentes.

Se pueden utilizar argumentos similares que implican la evolución molecular prebiótica para contrarrestar la afirmación de que el "ADN génesis" fue una casualidad milagrosa. Sin embargo, tales argumentos pueden ser innecesarios. Parece cada vez más plausible que la molécula autorreplicante original no fuera el ADN, sino una de las variedades de la molécula de ARN mucho más simple. Además, el ARN responde a la paradoja del huevo y la gallina. A principios de la década de 1980, Sidney Altman y Thomas Cech demostraron que algunos tipos de moléculas de ARN también podían actuar como catalizadores; podían desempeñar el papel de las enzimas. Estas enzimas del ARN — o ribosomas — llevaron a la idea del "mundo del ARN" — un tiempo en la historia temprana de la vida cuando el ARN catalítico permitió que todas las reacciones químicas tuvieran lugar que son necesarias para las estructuras celulares primitivas. En cierto sentido, ni la gallina ni el huevo llegaron primero: el ARN catalítico actuaba como material genético y como enzimas.[220]

No parece haber ninguna razón fundamental para suponer que las moléculas básicas de la vida no podrían surgir a través de procesos naturales que tuvieran una probabilidad razonable de ocurrir. (Aunque, con toda honestidad, uno tiene que admitir que las vías químicas que conducen a las primeras moléculas de ARN todavía son turbias. La evolución subsiguiente de las estructuras celulares hasta UACU es igualmente poco clara. Hay varios escenarios que compiten entre sí, cada uno con sus ventajas e inconvenientes. Además, varias preguntas — tales como por qué la vida usa sólo la forma izquierda de aminoácidos, y si el código genético es inevitable o simplemente uno de toda una serie de posibles códigos — están pendientes.

Sin embargo, los avances en estos ámbitos son rápidos, y podemos esperar que el panorama sea más claro en unos pocos años. Incluso si la vida resulta tener un origen completamente diferente del esbozado arriba — y hay varias otras hipótesis que compiten — no estamos todavía impulsados a la hipótesis de que la vida fue una casualidad extraña. Hay, sin embargo, un último argumento a considerar con respecto a la probabilidad de que la Tierra primitiva sea el sitio de la génesis de la vida: paradójicamente, ¡la vida parece haber surgido aquí con demasiada facilidad!

FIGURA 69 Los estromatolitos, similares a los que se muestran



aquí, son los fósiles más antiguos conocidos. Los más antiguos tienen 3.500 millones de años.

¿Cuándo surgió la vida en la Tierra?

La vida parece haber tenido pocos problemas para emerger en la Tierra. Sabemos que nuestro planeta se formó hace unos 4.550 millones de años. Un máximo de 700 millones de años después de la formación de la Tierra —hace 3.850 millones de años— parece que la vida ha evolucionado. Creemos que este es el caso porque ciertas rocas sedimentarias en Isua, Groenlandia —rocas que se encuentran entre las más antiguas de este planeta — contienen isótopos de carbono en una proporción que es un signo de procesos biológicos (La interpretación de estas medidas no está exenta de controversia. Puede ocurrir que los procesos no biológicos generen una relación isotópica de carbono similar. Sin embargo, muchos biólogos aceptan que la vida existía en ese momento). Ya que estas están entre las rocas más *antiguas* conocidas, podemos decir que hay poca evidencia geológica directa de que alguna vez hubo un tiempo en que la vida estuvo ausente de la Tierra. Los primeros fósiles no son mucho más jóvenes que las rocas de Isua; los estromatolitos — montículos formados por capas de cianobacterias y sedimentos atrapados — se conservan como fósiles en el Grupo Warrawoona en Australia Occidental. Estos estromatolitos tienen 3.500 millones de años.

La prisa con la que surgió la vida es casi demasiado rápida para la comodidad. El período de tiempo antes mencionado para la aparición de la vida, es decir, 700 millones de años, es un límite superior: ese período de tiempo está limitado por ambos extremos. Por un lado, presumiblemente hubo algún proceso evolutivo que condujo a las formas de vida que encontramos en las rocas de Groenlandia; ciertamente las cianobacterias del Grupo Warrawoona tenían una bioquímica tan sofisticada como otras formas de vida. En otras palabras, si encontramos rocas más viejas bien podríamos encontrar

evidencia de vida en esas rocas — tal vez formas de vida más simples, pero la vida no obstante. Así, es casi seguro que la vida surgió antes de que la Tierra tuviera 700 millones de años. Por otra parte, la vida no podría haber sobrevivido a las condiciones de la Tierra muy primitiva. (El período inicial después de la formación de la Tierra, hace unos 4.550 a 3.900 millones de años, se llama la era Hadeana. Las rocas de Isua fueron colocadas en la era del Arcaico Temprano, que va desde hace 3.900 a 2.900 millones de años. Como se discutió en la página 283, la primera parte de la era Hadeana vio la Tierra salpicada de impactos de cuerpos grandes. Es difícil comprender la violencia del impacto literalmente demoledor de la Tierra que sacó el material que se convirtió en nuestra Luna. Ciertamente el impacto habría esterilizado la Tierra Hadeana: si existiera alguna forma de vida antes del impacto, no podría haber sobrevivido. Así que el período de 700 millones de años postulado para la aparición de la vida es un límite superior: el período real fue probablemente menor que este.

Aunque varios cientos de millones de años parezcan ofrecer suficiente tiempo para que la vida evolucione, vale la pena recordar que la brecha entre la vida y la no vida es enorme, y que la evolución puede ser un proceso lento. Como dijo la bióloga Lynn Margulis: "La brecha entre la no vida y una bacteria es mucho mayor que la brecha entre una bacteria y el hombre." Sin embargo, esta brecha se superó con relativa rapidez. Algunos científicos encuentran difícil aceptar que la vida podría haber comenzado tan temprano en la Tierra sin ayuda, y han recurrido a la hipótesis de la panspermia (ver Solución 4).

Si la vida llegó a la Tierra a través del espacio, entonces hay implicaciones a considerar para la paradoja de Fermi. Las implicaciones, sin embargo, dependen exactamente de dónde proceden las semillas de la vida. Si la vida viajó a través del espacio interestelar y sembró nuestro planeta, entonces presumiblemente hay un sinnúmero de planetas en la Galaxia que fueron sembrados de manera similar. La vida estará en todas partes. Por otro lado, algunos astrobiólogos han sugerido que la vida se originó en Marte —donde las condiciones pueden haber sido más propicias para el desarrollo de la vida— y fue transportada a la Tierra sobre rocas que fueron expulsadas al espacio después de eventos de impacto. Cuando Marte perdió su agua, la vida murió allí; a medida que las condiciones en la Tierra se establecieron más, la vida floreció aquí. Si esto es lo que sucedió, entonces la vida puede ser escasa aunque la vida misma se forme fácilmente. Puede ser que se necesiten *dos* planetas para que la vida prospere: un pequeño planeta en el que pueda originarse la vida, un planeta cercano, más masivo, que pueda proporcionar un hogar a largo plazo para la vida, y los impactos de los meteoritos generando suficientes eyecciones para transportar la vida de un planeta a otro. Tal combinación de circunstancias podría ser altamente improbable.

Encontrando Vida en Otros Mundos

Existe, por supuesto, una forma directa de determinar si la vida puede surgir en condiciones naturales: podríamos intentar encontrarla en otros planetas.[221] La actividad de SETI es una forma de hacer esto, pero hay otra forma. Podríamos buscar vida primitiva en otras partes del Sistema Solar. Si encontráramos vida en otro lugar —incluso en el microbio más simple— al menos sabríamos que la vida no es exclusiva de la Tierra. Encontrar vida en otros mundos nos diría casi con toda seguridad algo sobre cómo surgió en éste.[222]

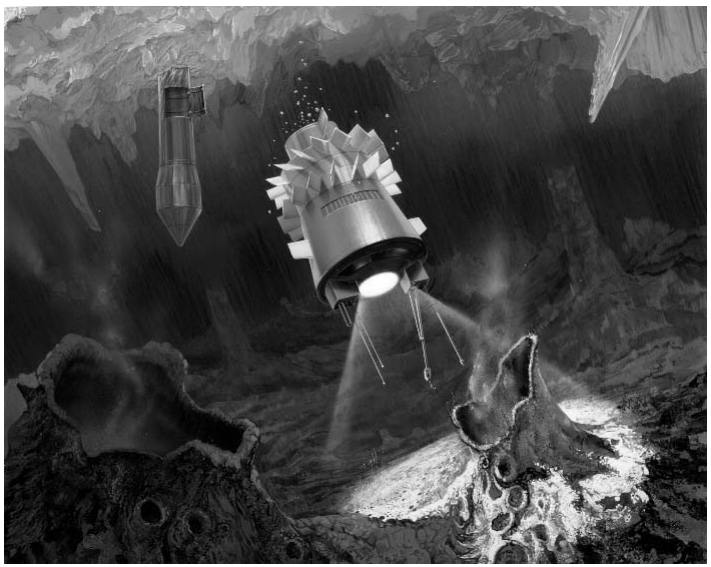


FIGURA 70 Si hay un océano bajo el hielo de Europa, entonces un hidrobot similar a la impresión de este artista probablemente se utilizará para explorarlo. Los científicos de la NASA están examinando actualmente los detalles de cómo enviar un hidrobot a Europa, hacer que penetre en el hielo y llegue al océano sin introducir contaminación, y luego hacer que envíe información a la Tierra.

El ingrediente clave de la vida parece ser el agua: encontrar agua y existe la posibilidad de encontrar vida. Sabemos que, en el pasado, es casi seguro que Marte poseía agua; así que existe la posibilidad — no importa cuán remota sea — de encontrar restos fósiles de la vida marciana del pasado. En el actual Sistema Solar, al menos tres cuerpos además de la Tierra podrían tener océanos. Dos de las lunas de Júpiter — Europa y Calisto — podrían poseer océanos de agua subterránea. Estos cuerpos están lejos del calor del Sol, por supuesto, y en la superficie de estas lunas hay gruesas capas de hielo; pero la calefacción geotérmica y mareomotriz puede ser suficiente para mantener el agua líquida bajo la superficie. Titán, una luna de Saturno, puede poseer un océano subterráneo de amoníaco-agua. Aquí hay tres lugares que tal vez — sólo tal vez — son el hogar de la vida extraterrestre. No sería la vida con la que podríamos comunicarnos; pero si supiéramos que la vida surgió *independientemente* en nuestro Sistema Solar más de una vez, entonces ¿cómo podríamos razonablemente argumentar que la vida es rara en toda la Galaxia? Seguramente, entonces, las misiones a Europa y Calixto, y más tarde

a Titán, deberían ser una prioridad.[223]

SOLUCIÓN 44: LA TRANSICIÓN PROCARIOTA-EUCARIOTA ES RARA

La vida puede cambiar.
Percy Bysshe Shelley,
Hellas

Para algunos biólogos, la prisa con la que las células aparecieron en la Tierra implica que la generación de vida a partir de materia inanimada es sencilla. Si la Tierra es típica, entonces millones de planetas en la Galaxia podrían ser el hogar de vida microbiana. Sin embargo, aunque los eucariontes podrían ser tan antiguos como las archaea y las bacterias, la maquinaria bioquímica bizantina de la célula eucariota moderna tardó mucho tiempo en alcanzar su nivel actual de sofisticación. Puede que haya llevado un billón de años; tal vez más. El desarrollo de grandes organismos multicelulares tomó aún más tiempo. Esto no es necesariamente sorprendente: las células eucariotas son inmensamente más complejas que las células procariotas, y hubo que hacer varios desarrollos evolutivos antes de que las diferentes células eucariotas pudieran aprender a cooperar y funcionar eficazmente en grupos. Pero tal vez este largo tiempo implica que el desarrollo del grado de vida eucariota sigue un camino tortuoso y difícil. Presumiblemente, la vida multicelular compleja en cualquier parte de la galaxia debe evolucionar a partir de la vida microbiana unicelular. Tal vez la vida eucariota compleja — y por lo tanto la vida capaz de comunicarse a través de distancias interestelares — aún no se ha desarrollado en otros planetas. Quizás esto explica el silencio del Universo. Tal vez la Galaxia está llena de planetas en los que la vida se ha estancado en la etapa procariota.

¿Qué llevó al cambio del grado de vida procariota, que dominó la vida en la Tierra durante tanto tiempo, al grado de vida eucariota que vemos hoy en día a nuestro alrededor? Para responder a esto — y para tratar de entender si el grado de vida eucariota podría ser un fenómeno raro — necesitamos entender algo de las diferencias entre dos tipos de células.

Diferencias entre las células procariotas y eucariotas

Sea cual sea la forma en que se considere, las bacterias siempre han sido las formas de vida más exitosas de la Tierra. Su simplicidad, combinada con su capacidad de reproducirse rápidamente, casi garantiza el éxito. Evolucionan las respuestas bioquímicas a los desafíos ambientales, por lo que aunque todas tienden a parecerse, las diferentes especies bacterianas poseen diferentes metabolismos y pueden habitar una amplia variedad de nichos. También son extremadamente resistentes, y algunas especies parecen haber

sobrevivido sin cambios durante miles de millones de años.

Las formas de vida eucariotas complejas, como las plantas y los animales, son mucho menos robustas. Son propensos a las extinciones masivas, e incluso en el curso natural de las cosas la vida típica de una especie animal se mide en millones en lugar de miles de millones de años. Sin embargo, el grado de vida eucariota es mucho más interesante que el grado procariota. Los eucariotas evolucionan las respuestas morfológicas a los desafíos ambientales — en otras palabras, desarrollan nuevas formas y partes del cuerpo — lo que lleva a una variedad y frescura ausente en los procariotas.

Una diferencia importante entre las células eucariotas y procariotas es que estas últimas tienen paredes celulares rígidas o membranas celulares muy rígidas, mientras que las células eucariotas carecen de paredes celulares o tienen paredes muy flexibles. Esta flexibilidad permite que las células eucariotas cambien de forma, y también que se involucren en la *citosis* — un proceso en el cual la membrana celular empuja hacia adentro para formar una vacuola intracelular. Muchos procesos celulares emplean citosis, pero quizás su papel principal es en la *fagocitosis*. En la fagocitosis, una célula eucariota envuelve una partícula de alimento en una vacuola de alimento, donde las enzimas la digieren. Obtener una nutrición como ésta por depredación es un proceso mucho más eficiente que el empleado por las bacterias, que secretan enzimas digestivas en el medio circundante y luego absorben las moléculas resultantes.

Otra característica distintiva es que una célula eucariota tiene un núcleo, separado del citoplasma por dos membranas, que contiene el ADN de la célula. Las células eucariotas también contienen organellas —pequeños órganos— que están separados del citoplasma por membranas. Las organellas incluyen las *mitocondrias* (que juegan un papel vital en el metabolismo energético) y los *plastidos* (que juegan un papel en la fotosíntesis en plantas y algas). A principios de la década de 1970, Lynn Margulis argumentó que las organellas debían haber surgido por simbiosis. Razonó que, hace miles de millones de años, las células eucariotas muy primitivas habrían utilizado la fagocitosis para ingerir células procariotas más pequeñas como alimento. Algunas células procariotas podrían haber sido indigeribles y habrían permanecido en las células eucariotas más grandes durante algún tiempo. Y algunos de esos procariotas habrían realizado funciones — como la transformación de la energía — más eficientemente que sus anfitriones. Ambas células se beneficiarían de la asociación, y ambas tendrían una ventaja selectiva a la hora de transmitir sus genes. Un pedazo de alimento inicialmente indigerible se convertiría en indispensable para el buen funcionamiento de una célula eucariota. El apoyo a la idea de Margulis ha venido de la secuenciación de ADN. Las mitocondrias y las plastidos tienen su propio ADN, que es diferente del ADN del núcleo de una célula. Resulta que el ADN mitocondrial y el ADN plastido son mucho más cercanos al ADN procariota que al ADN eucariota. Las mitocondrias, por ejemplo,

probablemente comparten un antepasado común más cercano con las actuales bacterias simbióticas de color púrpura sin azufre. (La evidencia directa de la hipótesis de Margulis probablemente ha sido borrada por mil millones de años de evolución, pero la hipótesis tiene tanto sentido que es ampliamente aceptada.

Existe otra diferencia importante entre los dos tipos de células. A diferencia de las procariotas, las nuevas eucariotas pueden formarse a través de la fusión de gametos de dos padres; en otras palabras, el sexo puede ocurrir. Además, la cantidad de información genética almacenada por los eucariotas (y transmitida ya sea a través del sexo o a través de la partenogénesis) es mucho mayor que la almacenada por los procariotas.

Finalmente, los eucariontes poseen un *citoesqueleto*. El citoesqueleto consiste en filamentos de actina, que resisten cualquier fuerza de tracción que pueda actuar sobre una célula, y microtúbulos, que resisten cualquier fuerza de cizallamiento o compresión que pueda actuar sobre una célula. Así, incluso en ausencia de una pared celular rígida, una célula eucariota puede mantener su forma e integridad. Pero el citoesqueleto puede hacer mucho más: puede dibujar la célula en una variedad de formas temporales, ordenar las organellas en varias posiciones, y permite que la célula eucariota aumente de tamaño. La actina y la tubulina — las proteínas estructurales a partir de las cuales se forma el citoesqueleto — se encuentran entre las más importantes de todas las proteínas para el desarrollo de la vida compleja.

¿Qué tan probable fue el desarrollo de las células eucariotas?

¿Era inevitable esta transición de una célula primitiva a la impresionante complejidad de una célula eucariota moderna? ¿O fue casualidad? Estas son preguntas difíciles de responder, sobre todo porque los muchos pasos involucrados en la transición ocurrieron hace mucho tiempo. Uno de los primeros pasos debe haber sido la pérdida de la pared celular rígida, aunque esto habría sido fatal para la mayoría de los organismos que lo intentaron. (La penicilina, por ejemplo, funciona bloqueando la formación de paredes celulares bacterianas. Sin una pared rígida para protegerlos, la mayoría de los organismos unicelulares son vulnerables a los ataques del medio ambiente. La eliminación de la pared celular fue en *última instancia* extremadamente útil, porque permitió que ocurriera la fagocitosis. Pero la fagocitosis evolucionó en una fecha posterior y por lo tanto no podría haber proporcionado ningún beneficio *inmediato* al organismo que perdió la pared. La evolución no tiene previsión; a menos que un organismo pueda sobrevivir en el aquí y ahora y pasar sus genes a su descendencia, cualquier potencial que pueda poseer se perderá. De alguna manera, en formas que aún no se han entendido, algunos organismos lograron emplear nuevas proteínas estructurales — actina y tubulina — y desarrollar un citoesqueleto que ayudó a mitigar la pérdida de la pared. ¿Qué probabilidades había de que esto ocurriera? Simplemente no lo

sabemos. El origen de las organellas se comprende mejor —se produjo por simbiosis como, tal vez, lo hizo el núcleo celular-, pero ¿qué ocurre con el origen de lo que puede ser la innovación más importante de todas: la cooperación entre las células?

Organismos Multicelulares

Algunas procariotas han adoptado un estilo de vida multicelular. Los estromatolitos, por ejemplo, consisten en colonias bacterianas. En general, sin embargo, las células procariotas viven una vida solitaria (e incluso en el caso de los estromatolitos es discutible si el término "organismo" está justificado). Durante la mayor parte de la historia de la Tierra, las células eucariotas también vivieron vidas aisladas. Entonces ocurrió una transformación notable. Algunas células eucariotas descubrieron los beneficios de unirse. Debido a que las células no tenían paredes externas que las aislaran del medio ambiente y unas de otras, eran libres de intercambiar información y compartir materiales. El resultado fue el mundo que vemos hoy: tres reinos de organismos que son enormemente complejos y variados: hongos, plantas y, lo más complejo de todo, animales.

Se desconoce qué causó que las células eucariotas unieran sus recursos. Ni siquiera está del todo claro *cuándo* se produjo el cambio a la multicelularidad. Un acontecimiento crucial en la historia de la vida fue la explosión cámbrica de hace 540 millones de años, en la que se establecieron las diversas formas en los cuerpos de los animales, y que parece haber sido un paso clave en el camino hacia la vida inteligente en la Tierra. La explosión de Cámbrico vio la fosilización de un amplio surtido de animales — así que los animales ciertamente existían en ese momento. Hay pocos fósiles de animales en rocas de más de 540 millones de años. Sin embargo, todo lo que podemos deducir de esta observación es que los animales grandes con partes duras del cuerpo se hicieron comunes en el período cámbrico. Es totalmente posible que pequeños animales de cuerpo blando existieran antes del período cámbrico y murieran sin dejar rastro. (Los nematodos son quizás el tipo de animal más abundante en el mundo hoy en día. Deben haber existido al menos desde la explosión del Cámbrico, pero no han dejado rastro en el registro fósil. La secuenciación de genes lleva a algunos biólogos a creer que los animales se originaron hace mil millones de años, lo que, si es cierto, significa que el registro fósil sólo se relaciona con la mitad de la historia de la vida animal en la Tierra. Ya sea que los animales se hayan originado hace mil millones de años, hace quinientos millones de años o en algún momento intermedio, el hecho es que son "recién llegados" en la historia de la Tierra. Las criaturas unicelulares habían existido desde poco después de que la Tierra se enfriara; se necesitaron 3 mil millones de años para que las criaturas complejas se desarrollaran. ¿Por qué la larga espera de la multicelularidad?

Una sugerencia (aún controvertida) es que un aumento en el contenido de

oxígeno de la atmósfera encendió la explosión del Cámbrico.[224] Al principio de la historia de la Tierra no había esencialmente oxígeno libre. Esta falta de oxígeno no representaba ninguna dificultad para los procariotas primitivos; de hecho, para los primeros organismos vivos, e incluso para algunas bacterias actuales, la exposición al oxígeno significaba una muerte segura. Sin embargo, organismos como las cianobacterias producían oxígeno como subproducto de su metabolismo. Durante 2.000 millones de años —desde hace unos 3.700 millones de años hasta hace unos 1.700 millones de años— estos organismos bombearon oxígeno al medio ambiente. Durante la mayor parte de ese tiempo hubo suficientes sumideros, como el hierro disuelto en los océanos, para atrapar el oxígeno. Sin embargo, con el tiempo, los sumideros se llenaron y el contenido de oxígeno de la atmósfera comenzó a aumentar. Para muchos organismos, este evento significó el fin; la "crisis del oxígeno" debe haber creado la mayor de todas las extinciones masivas, con muchas especies procariotas que simplemente no se adaptan a la liberación a gran escala de dicho veneno. Algunos organismos, sin embargo, prosperaron: desarrollaron un metabolismo basado en el oxígeno, descomponiendo los alimentos en dióxido de carbono y agua. Este metabolismo de oxígeno generó más energía que los metabolismos anaeróbicos, y los organismos prosperaron; los eucariontes prosperaron más que todos. Sin embargo, hasta hace unos 550 millones de años, la concentración de oxígeno en la atmósfera y disuelto en los océanos era muy inferior a las cantidades actuales. Cualquier animal que exista antes de este período debe haber obtenido oxígeno para sus tejidos por difusión, lo cual es un proceso lento. Esos animales no habrían tenido corazón —al menos, ninguna bomba— ni habrían poseído un sistema circulatorio. Habrían sido criaturas pequeñas, finas como un hilo de araña, por lo que no es de extrañar que no dejaran rastro en el registro fósil. Pero entonces, por alguna razón que no está del todo clara, el nivel de oxígeno atmosférico aumentó de nuevo en el período cámbrico. Varios desarrollos evolutivos clave tuvieron lugar — branquias, hemoglobina en la sangre, corazones — permitiendo a los animales marinos hacer un uso mucho más eficiente del oxígeno y transportar el gas a diferentes tejidos. Los animales se hicieron más grandes y voluminosos y fueron capaces de desarrollar varios órganos especializados. Tal vez la aparición de un depredador hizo que otras especies evolucionaran hacia la protección en forma de caparazones duros — y finalmente los animales podrían convertirse en fósiles.

La sugerencia, entonces, es que la explosión del Cámbrico fue causada por un aumento en el nivel de oxígeno en la atmósfera. Y tal vez esto fue un acontecimiento menos que inevitable. Tal vez en la mayoría de los planetas el desarrollo de grandes organismos multicelulares no tiene lugar.

* * *

Como hemos visto, hubo muchos pasos que llevaron de organismos unicelulares simples a organismos complejos que consisten en grupos de

células trabajando juntas. En la Tierra, se necesitaron miles de millones de años para que estos pasos ocurrieran y para que aparecieran los animales. Cuáles de estos pasos fueron vitales y el calendario para que ocurran son todavía objeto de debate. Y puede ser que algunos de los pasos requirieron cambios ambientales más que biológicos.

Es al menos una resolución plausible de la paradoja de Fermi que la vida en otras partes de la galaxia se haya estancado en la etapa unicelular. Es posible que algún día visitemos planetas y encontremos océanos repletos de organismos extraños y microscópicos — mucha vida, pero vida de bajo grado. Tal vez en ningún otro lugar tuvo lugar la secuencia correcta de eventos biológicos y ambientales que harían posible la evolución de la vida animal y, por lo tanto, de las especies inteligentes con las que podemos comunicarnos.

SOLUCIÓN 45: LAS ESPECIES FABRICANTES DE HERRAMIENTAS SON RARAS

El hombre es un animal que fabrica herramientas.
Benjamin Franklin
(atribuido por James Boswell*, Life of Johnson)*

El camino desde las primeras células eucariotas hasta los animales que vemos hoy en día fue tortuoso y, muchos argumentarían, lejos de ser inevitable. Puede haber varios obstáculos que superar antes de que las especies animales puedan florecer, y tal vez la respuesta a la pregunta de Fermi está en esos obstáculos. Pero supongamos que una vez que la célula eucariota se ha desarrollado, entonces todo es cuesta abajo desde allí; con el tiempo suficiente, la vida animal avanzada definitivamente aparecerá en un planeta. ¿Se deduce entonces que se desarrollará una especie animal capaz de construir un radiotelescopio? Tal vez no.

La gente ha buscado durante mucho tiempo identificar una característica definitoria de la humanidad — un atributo que distingue al Homo sapiens de los animales de la Tierra. Un rasgo que a menudo se propone para esta función es el uso y la fabricación de herramientas. "Hombre fabricante de herramientas" es una imagen poderosa. Si la fabricación de herramientas es única para los seres humanos, si entre los miles de millones de especies que han vivido en la Tierra sólo el *Homo sapiens* ha dominado las complejidades de las herramientas, entonces podríamos tener una resolución de la paradoja de Fermi. Tal vez el uso y la fabricación de herramientas son raros en cualquier parte de la galaxia. Y sin herramientas para construir naves espaciales o balizas, es presumiblemente imposible para una especie biológica hacer conocer su presencia a través de las profundidades del espacio.

* * *

Hay una gran dificultad con esta sugerencia: muchas especies usan herramientas y bastantes especies las hacen.

Por ejemplo, varias especies de aves usan ramitas para arrancar gusanos de la corteza de los árboles. Las nutrias marinas colocan piedras de yunque en sus pechos y las usan para romper las conchas de cangrejo. Las avispas usan pequeños guijarros para ayudar a esconder las entradas a las madrigueras donde han puesto sus huevos. Los alimoches recogen piedras en sus garras y las dejan caer sobre nidos de avestruces para abrir los huevos. La lista de uso de herramientas entre los animales es larga. Por supuesto, ninguno de estos ejemplos es lo que entendemos por uso de herramientas. Estos comportamientos animales son altamente estereotipados; son respuestas específicas y repetitivas a problemas particulares. Cambia la naturaleza del

problema y estas criaturas se perderán. En ninguna parte estos animales muestran perspicacia; esas exhibiciones elaboradas son el resultado inteligente de una evolución sin cerebro.

Si necesitamos mejores ejemplos de uso de herramientas, entonces nos vemos obligados a mirar a los primates. En este punto, el *Homo sapiens* comienza a parecer especial, si no único, ya que incluso entre los primates hay relativamente pocos ejemplos "reales" de uso de herramientas. Aparte de los grandes simios, a los que llegaremos en un momento, el único primate que espontáneamente usa herramientas en la naturaleza es el mono capuchino (el tipo de mono empleado por los organilleros). Los trabajadores del campo han observado que los capuchinos ponen piedras y palos para una variedad de usos; entre otras cosas, los monos los usan para obtener alimento y repeler a los depredadores. En el laboratorio, los capuchinos aprenden a usar palos para obtener nueces de diferentes montajes experimentales. Sin embargo, los capuchinos no tienen un entendimiento real de los *principios* del uso de herramientas, ni ninguna comprensión de por qué una técnica en particular podría funcionar o fallar. Obsérvenlos, y está claro que se involucran en el ensayo y error pinchando y pellizcando.

De todos los animales, es el chimpancé el que parece hacer el uso más creativo de las herramientas en la naturaleza. Los chimpancés de África Occidental, por ejemplo, usan una piedra de martillo y una piedra de yunque para abrir las nueces (y hacen un mejor trabajo de romper nueces que yo en Navidad). Las piedras adecuadas pueden escasear, y los chimpancés a menudo tienen que llevarlas a largas distancias hasta una fuente de nueces. Estos chimpancés planean con antelación. Los chimpancés de Tanzania usan una variedad de ramitas para una variedad de propósitos, y las ramitas son modificadas de antemano si es necesario. Estos chimpancés están *haciendo* herramientas. También emplean varios elementos del follaje para una variedad de funciones — hojas de plátano se utilizan como paraguas, hojas más pequeñas se utilizan para limpiar la suciedad, y las hojas masticadas se utilizan como esponjas. Tal vez aún más impresionantes son los logros de Kanzi — pregonados por algunos como un verdadero Edison del reino animal. Kanzi es un bonobo (una especie que, junto con su especie hermana, el chimpancé, es nuestro pariente más cercano en el reino animal). Entre muchos otros logros, Kanzi ha dominado los rudimentos de la producción de herramientas de piedra. (Sin embargo, este logro en particular no debe ser exagerado. A Kanzi se le enseñó a tomar núcleos de roca y a partir de ellos hacer escamas de piedra capaces de cortar un cordón. Después de aproximadamente un año, Kanzi había realizado espontáneamente varias mejoras y avances en la técnica de fabricación de escamas que se le había enseñado. Sin embargo, las escamas de piedra que producía eran pequeñas; Kanzi claramente no entendía las propiedades de la roca y no sabía cómo fracturar mejor la roca para obtener escamas grandes y útiles. Además, nunca se ha observado que los bonobos usen herramientas en la naturaleza. Kanzi

tuvo el beneficio del entrenamiento intensivo y la enseñanza por humanos.

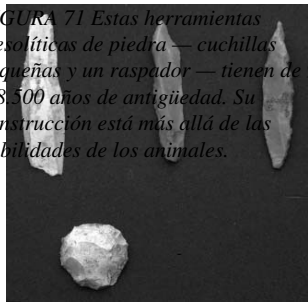


FIGURA 71 Estas herramientas mesolíticas de piedra — cuchillas pequeñas y un raspador — tienen de 9.000 a 8.500 años de antigüedad. Su construcción está más allá de las habilidades de los animales.

La lección que hay que aprender de estos ejemplos es quizás ésta: los animales usan herramientas porque pueden. El uso de herramientas no es tanto un indicador de la "inteligencia" natural de un animal como un reflejo de las capacidades de manipulación (y de las adaptaciones evolutivas que su especie ha hecho para adaptarse a un nicho ecológico particular). Un ave puede usar su pico para una variedad de propósitos, un elefante puede usar su trompa, y un chimpancé es afortunado en poseer una mano que puede manipular objetos de varias maneras. Sin embargo, un camello, o una vaca, o un gato, nunca va a ser un usuario de herramientas naturales — no porque estas criaturas sean inherentemente inferiores a los pájaros o menos inteligentes que los chimpancés, sino simplemente porque carecen de la habilidad manipuladora requerida. Presumiblemente si pudieran usar herramientas, lo harían.

La humanidad es afortunada: nuestra especie posee una mano que permite una gama de acciones bastante asombrosa. (Cuente de cuántas maneras diferentes configura su mano para llevar a cabo tareas durante un día típico. Te sorprenderás.) Somos excelentes fabricantes de herramientas porque tenemos las habilidades manipuladoras para ser excelentes fabricantes de herramientas — y cuando esto se combina con nuestros otros rasgos, como el lenguaje y la vida social, no es difícil entender por qué nuestro uso de herramientas es cualitativamente diferente al de otras especies. (El punto de vista que he descrito anteriormente es bastante diferente del punto de vista tradicional, que dice que somos mejores fabricantes de herramientas que otros animales porque somos más inteligentes que otros animales. Pero uno puede hacer un argumento fuerte para decir que el uso de herramientas por parte del hombre primitivo fue uno de los impulsores del aumento de la inteligencia humana — inteligencia que luego fue cooptada para otros propósitos. El circuito neuronal requerido para controlar las manipulaciones de precisión de la mano humana, y para gobernar actividades como el lanzamiento de proyectiles a presas en movimiento, es fenomenal — y bastante más allá de la capacidad de cualquier robot actual).[225]

Tenemos que preguntarnos, entonces: ¿cuál es la posibilidad de que una especie extraterrestre siga el mismo tipo de ruta evolutiva que el hombre siguió? Por supuesto, un extraterrestre no necesita manos de cinco dedos para construir un radiotelescopio; el curso de la evolución no tiene que ser

idéntico. Pero para desarrollar tecnología avanzada se necesitará *algún* tipo de precisión— habilidad manipulativa (ya sea usando garras, tentáculos o algo más allá de nuestra imaginación) combinada quizás con otras características como la visión estereoscópica. No tenemos forma de saber qué tan probable o improbable sería tal resultado evolutivo. Pero me resulta difícil creer que *ninguna* otra especie haya podido desarrollar las habilidades necesarias para fabricar herramientas. La fabricación de herramientas es quizás un obstáculo más que hay que superar antes de que una especie pueda comunicarse, pero una forma más en la que un mundo lleno de vida todavía puede fracasar a la hora de producir una civilización capaz de comunicarse con nosotros. Pero seguramente esto no puede ser la única explicación de la paradoja de Fermi.

SOLUCIÓN 46: EL PROGRESO TECNOLÓGICO NO ES INEVITABLE

El progreso, la marca distintiva del hombre.
Robert Browning,
Una muerte en el desierto

El hombre es ahora la única especie homínida de la Tierra, pero hasta hace poco —hasta hace unos 30.000 años— compartíamos el planeta con al menos otra especie humana. Ciertamente coexistimos con el *Homo neanderthalensis,* y puede que coexistíamos con el *Homo erectus.* (30.000 años parece mucho tiempo, pero es un mero instante en el Año Universal; incluso en la historia de nuestra especie representa menos de un tercio del tiempo que hemos existido. Esta comprensión —que una vez no estábamos solos— es bastante reciente, ya que muchos antropólogos solían pensar que sólo una especie de homínido podía haber existido en un momento dado; en este punto de vista, los neandertales deben haber sido nuestros antepasados. La evidencia reciente, sin embargo, parece descartar esta posibilidad. Estudios de ADN mitocondrial de *Homo sapiens* y *Homo neanderthalensis* muestran que eran dos especies genéticamente distintas. El hallazgo está respaldado por las recientes reconstrucciones informáticas de los cráneos de los neandertales y de los primeros humanos modernos: el desarrollo del cráneo era bastante diferente. Por lo tanto, parece cierto que el *Homo sapiens* y el *Homo neanderthalensis* son especies separadas, que comparten un antepasado común en un pasado lejano —quizás ya hace 500.000 años— antes de evolucionar de forma separada. Parece igualmente claro que, aunque puede haber habido un pequeño grado de mestizaje, los neandertales no contribuyeron en nada al acervo genético humano moderno.[226]

La Tierra puede haber sido el hogar de 20 o más especies de homínidos en varios momentos, y algunas de estas especies deben haber coexistido. La simple imagen de la evolución homínida —una criatura parecida a un simio que evoluciona gradualmente hacia especies "más avanzadas" y culmina finalmente con el hombre— es errónea. Más bien, el *Homo sapiens* es la última rama que queda en lo que fue una rama enrevesada del árbol evolutivo. Cada una de las diversas especies de homínidos ocupaba un nicho, y cada una poseía diversas habilidades y atributos.

Nuestro conocimiento de las especies homínidas anteriores es incompleto, pero sabemos mucho más sobre nuestros parientes más cercanos, los Neandertales. (Nuestros parientes más cercanos que aún existen son los grandes simios, con quienes compartimos un antepasado común que vivió hace unos 5 millones de años. Es instructivo recordar las habilidades y logros de nuestra especie hermana. Los neandertales individuales deben haber vivido vidas cortas y duras, pero como especie sobrevivieron durante mucho tiempo

—mucho más de lo que la humanidad ha existido-; habitaron una gran área de la Tierra; se enfrentaron a cambios severos en el clima; en resumen, lograron llenar un nicho biológico. Hay alguna evidencia de que los neandertales enterraron a sus muertos (aunque es dudoso que esta práctica estuviera asociada con el ritual que acompaña a los entierros humanos modernos).

También hay algunas pruebas, a partir de análisis de cráneos de Neandertal, que pueden haber tenido la capacidad física para hablar (aunque parece más probable que carecían de la capacidad de comunicarse en la forma en que lo hacemos nosotros). Es particularmente interesante que tuvieran una forma de tecnología de herramientas, llamada *Mousterian* (en honor a la cueva francesa de Le Moustier donde tales herramientas fueron descubiertas por primera vez). Las herramientas Musterianas están hechas de piedra y toman una variedad de formas básicas. Los artesanos Musterianos, entonces, presumiblemente fueron capaces de mantener en sus mentes varios patrones de diseño de herramientas y, combinados con su profunda apreciación de las propiedades de la piedra, produjeron implementos muy hermosamente construidos. Puede que los neandertales no hayan igualado los logros de los humanos, pero no eran idiotas.[227]

Sin embargo, durante su período en la Tierra, los neandertales demostraron poco en el camino de la creatividad o la innovación. Si crearon arte, no ha sobrevivido; si hicieron música, sus instrumentos no han sobrevivido. Y su tecnología, aunque razonablemente eficaz, no estaba sujeta al tipo de progreso que hemos llegado a creer que es inevitable. Las herramientas Musterianas tardías no eran significativamente mejores que las de los primeros Musterianos. Los neandertales pronto aprendieron cómo trabajar la piedra, pero luego aprendieron poco más — no cómo trabajar el hueso o la cornamenta para las herramientas, por ejemplo. Así que si aceptamos que los neandertales eran inteligentes, entonces tenemos un ejemplo de una especie inteligente de fabricación de herramientas que ha sobrevivido durante más de 100.000 años sin lograr un avance tecnológico significativo. Se extinguieron —por razones no del todo claras— sin inventar el trinquete y mucho menos el radiotelescopio. Quizás esta situación se refleja en otros mundos. Tal vez por alguna razón (falta de lenguaje, falta de una "chispa creativa", falta de coordinación entre las manos y los ojos, falta de lo que sea) las especies exóticas alcanzan el nivel de fabricación de herramientas y luego permanecen en ese nivel. Quizás la Galaxia abunda con especies que son expertas en el manejo de madera, piedra o hueso, pero que nunca se desarrollan más. No sabemos nada de las CETs porque ninguno de ellos tiene la tecnología necesaria: en otras palabras, no existen CETs *comunicantes*.

Una debilidad de esta sugerencia es que requiere que todas las especies que fabrican herramientas se desarrollen de la misma manera. Es poco convincente de la misma manera que algunas de las explicaciones "sociológicas" no convencen cuando requieren que todos las CETs se comporten de la misma manera. Después de todo, incluso si las especies

homínidas en general han sido pobres innovadores tecnológicos, un miembro de la familia homínida es excepcionalmente innovador. Una de cada 20 especies de homínidos descubrió los beneficios de la innovación continua; si esa proporción se encuentra en otro lugar, las probabilidades de encontrar CETs no parecerían tan malas.

Sin embargo, antes de rechazar la sugerencia por completo, vale la pena señalar que durante gran parte de nuestra historia no fuimos mucho mejores que los Neandertales en lo que respecta a la innovación tecnológica. Sólo hace unos 40.000 años nuestra tecnología y arte comenzaron a deslumbrar.[228] (El arte rupestre de los Cro-Magnons es realmente deslumbrante. Es reconociblemente humano y nos habla a través de milenios. Es diferente a cualquier cosa que aparezca antes de esa fecha). Hasta esta explosión de creatividad, las dos especies homínidas sobrevivientes parecen haber estado igualmente estancadas. ¿Por qué ese cambio tan repentino? Hay varias explicaciones posibles. Tal vez el desarrollo del lenguaje desencadenó la explosión creativa. Quizás la explosión ocurrió mucho antes, pero los artefactos anteriores a hace 40.000 años no han sido preservados. Quizás los humanos de hace más de 40.000 años eran anatómicamente modernos, pero no poseían cerebros modernos. O quizás el conocimiento cultural acumulado lentamente hasta que, hace 40.000 años, superó un umbral crítico. No lo sabemos. Quizás lo que causó esta explosión de creatividad fue una casualidad, un accidente. Si lo fuera, entonces podríamos esperar que el número de CETs comunicantes fuera pequeño.

* * *

Un último punto. Inherente a la formulación de la paradoja de Fermi está la noción de un crecimiento exponencial del conocimiento y la tecnología. Tal vez la mayoría de nosotros creamos, conscientemente o no, que los primeros humanos estaban en la parte "plana" de la curva exponencial: el progreso llegó lentamente. Luego, con el paso del tiempo, el progreso se alimentó de sí mismo y terminamos hoy con las computadoras obedeciendo la ley de Moore. Extrapolamos esta curva exponencial hacia el futuro e imaginamos a nuestros descendientes teniendo acceso a una tecnología tremendamente poderosa; y, si las CETs están muy por delante de nosotros, esperamos que posean tecnologías tremendamente poderosas. Pero tal vez esto esté mal. En la Naturaleza, las curvas exponenciales nunca continúan indefinidamente. Tal vez la idea de que el progreso tecnológico continúe hasta que una especie pueda viajar o al menos comunicarse a través de distancias interestelares sea errónea.

Esta sugerencia me parece excesivamente pesimista, al menos a mí. Incluso con nuestra tecnología actual, podemos intentar comunicarnos con las estrellas. Dale a la humanidad otros 100 o 1.000 años, y quién sabe lo que logrará.

SOLUCIÓN 47: LA INTELIGENCIA A NIVEL HUMANO ES RARA

La mente es la gran palanca de todas las cosas; el pensamiento humano es el proceso por el cual los fines humanos son respondidos alternativamente.

Daniel Webster

Cuando Fermi preguntó "¿dónde están todos?", el "todos" se refirió a criaturas extraterrestres inteligentes. Mientras que el descubrimiento de *cualquier* vida en otro lugar sería profundamente importante, es la vida *inteligente* lo que buscamos. Es (presumiblemente) *sólo* la vida inteligente la que puede viajar entre las estrellas y con la que podemos comunicarnos, interactuar y aprender. Pero quizás la inteligencia — la clase que puede entender las leyes de la física y construir radiotelescopios — ¿es rara en el Universo? Hasta 50.000 millones de especies pueden haber vivido en la Tierra, pero sólo una tiene el tipo de inteligencia necesaria. Tal vez el desarrollo de la inteligencia es una casualidad, de modo que el término f_i en la ecuación de Drake es pequeño.

Hay muchos aspectos de esta cuestión, pero aquí hay espacio para tratar sólo dos. Primero, ¿qué *es* la inteligencia? Segundo, ¿cómo evolucionó?

¿Qué es la inteligencia?

En términos de las actividades del SETI, podemos definir razonablemente una especie como inteligente si puede construir un radiotelescopio. El problema con esta definición es que la humanidad aparentemente se volvió inteligente ¡sólo hace unos 50 años! Así que aunque en un sentido práctico podría ser una buena definición, fracasa por razones filosóficas. Debe haber una mejor manera de captar la esencia de la inteligencia.

Un enfoque común es definir la inteligencia en términos de ciertas tareas mentales que nos resultan difíciles, como jugar un juego decente de ajedrez o resolver una ecuación algebraica. Sin embargo, no es mucho más difícil escribir programas de ajedrez o de resolución automática de ecuaciones que realizar las actividades en sí. Y este software manifiestamente no posee inteligencia. Los tipos de actividad que los humanos y otros animales hacen sin pensar son mucho más difíciles de programar. Nadie se ha acercado todavía a la programación de un robot capaz de navegar por el mundo exterior o de hacer frente a los distintos retos que plantea la vida cotidiana. Si encontrar comida y evitar el peligro son cualquier medida de inteligencia, entonces el roedor promedio es mucho más inteligente que el robot más inteligente. Así que si queremos apreciar lo que la inteligencia realmente significa, y si los seres humanos son únicos en este sentido, podría ayudar si entendiéramos algo de la inteligencia animal. Desafortunadamente, si es

difícil definir la inteligencia en humanos, es aún más difícil definir la inteligencia en animales.

* * *

La mayoría de las personas, si se les pidiera que clasificaran a los animales no marinos en términos de inteligencia, probablemente clasificarían al hombre como el animal más inteligente, seguido tal vez por los simios, a través de los perros y los gatos, más abajo a través de los ratones y las ratas, más abajo aún a los pájaros, y así sucesivamente. Es una imagen cómoda para el ego humano: estamos en la cima del árbol de la inteligencia, nuestros parientes más cercanos son inteligentes, nuestras mascotas son bastante brillantes, y los animales que no nos gustan particularmente son estúpidos. Sin embargo, está implícita en este cuadro la noción de evolución como el progreso de un estado "menos evolucionado" (por ejemplo, ratas) a un estado "altamente evolucionado" (nosotros), siendo la inteligencia la escala con la que se puede medir el progreso. Esto es simplemente incorrecto.

En primer lugar, no tenemos ninguna razón para suponer que la inteligencia (por más que se defina) sea el único criterio por el que podemos clasificar a los animales. ¿Por qué no utilizar en su lugar la agudeza visual, la velocidad o la fuerza? De hecho, ¿por qué tratar de clasificar a los animales de esta manera en absoluto? No debemos ver la evolución como una escalera, con nosotros mismos en la cima y todos los demás animales debajo de nosotros porque aún no han "evolucionado lo suficiente" como para poseer inteligencia. Simios, pájaros, gatos, perros, ratones y hombres están igualmente "evolucionados", ya que compartimos un antepasado común que vivió hace cientos de millones de años. Las distintas especies se han adaptado a su entorno de diferentes maneras; nuestra especie tiene ciertas características que la hacen exitosa, pero también todas las demás especies del planeta. Todas estas especies tienen el mismo éxito, ya que han pasado la prueba crítica: todas han sobrevivido. Si queremos asignar diferentes niveles de inteligencia a diferentes animales, entonces necesitamos una mejor medida que nuestros prejuicios.

Cuando los biólogos intentan medir la inteligencia de los animales, se enfrentan a una tarea casi imposible. Medir el CI de los seres humanos de una manera no sesgada culturalmente es bastante difícil. Pero si las pruebas en humanos son tendenciosas, ¿cómo podemos probar la inteligencia de las diferentes especies animales? ¿Cómo podemos tener en cuenta las diferencias en la capacidad de percepción, la capacidad de manipulación, el temperamento, el comportamiento social, la motivación y todas las demás variaciones entre especies? ¿Un mono no completa un laberinto porque no tiene cerebro o porque está aburrido? Si un gato no presiona una palanca que produce una recompensa alimentaria, ¿debemos concluir que el gato es estúpido o simplemente no tiene hambre? ¿Falla una rata una prueba de inteligencia porque es densa, o porque la prueba exigía discriminación visual

(en la que las ratas son pobres) en lugar de discriminación entre olores (en la que las ratas sobresalen)? Este tipo de preguntas hacen que sea excepcionalmente difícil estar seguro de que estamos probando la capacidad cognitiva de un animal.

Supongamos que tratamos de tener en cuenta tantas variables entre especies como podamos pensar en estas pruebas cognitivas. (Por ejemplo, los biólogos podrían querer investigar cuántos elementos de la lista puede recordar un animal, o si un animal puede reconocer una cara; cualquiera de estas tareas podría decirnos algo sobre los procesos cognitivos en los animales. El investigador tendría que asegurarse de que los detalles de la prueba fueran diferentes para cada animal. Las pruebas para las palomas y para los chimpancés *tendrían* que ser diferentes, aunque sólo fuera para tener en cuenta sus diferentes habilidades físicas. Supongamos además que definimos la inteligencia, la inteligencia general, como una medida de lo bien que los animales obtienen puntajes en tales pruebas cognitivas fundamentales. Entonces surge un hecho sorprendente: ¡la mayoría de los animales actúan casi al mismo nivel! Por supuesto que hay algunas diferencias entre las especies, pero las diferencias son mucho más pequeñas de lo que uno podría esperar. Los chimpancés pueden recordar alrededor de siete cosas de una lista a la vez — pero también lo pueden hacer las palomas (así que no más chistes sobre "cerebros de pájaro"). Los monos pueden discernir rápidamente si el montón A contiene más golosinas que el montón B, pero también los gatos. De hecho, si la inteligencia se define como la capacidad de realizar estas tareas básicas no verbales, entonces uno puede argumentar que, para una primera aproximación, ¡todos los pájaros y mamíferos, incluida la humanidad, son casi igualmente inteligentes! Esta conclusión sigue siendo controvertida, pero si resulta ser cierta no deberíamos sorprendernos. Después de todo, todas las especies, incluida la humanidad, tienen que negociar el mismo mundo peligroso; todos tenemos que comer y beber y encontrar pareja. Las habilidades cognitivas básicas que permiten a los animales realizar estas tareas podrían ser comunes a todas las especies.

Por otra parte, también se puede adoptar el enfoque opuesto: quizás la inteligencia en los animales consiste precisamente en todos los factores que omitimos deliberadamente en las pruebas cognitivas. Para utilizar una analogía informática, no sólo debemos considerar el procesador (el cerebro), sino también los dispositivos de entrada y salida (los sentidos y la capacidad de manipulación de un animal). Después de todo, un chimpancé tiene manos que le permiten realizar tareas que una vaca simplemente no puede intentar. Desde este punto de vista, puede haber poca inteligencia general en el cerebro; más bien, la inteligencia debería definirse en términos de inteligencia *especializada*, es decir, adaptaciones que permitan a determinadas especies tener éxito en sus nichos ecológicos particulares. El apoyo a este punto de vista es que la capacidad de aprender (que es seguramente una gran parte de la inteligencia) parece ser especializada. Muchos animales pueden aprender una

tarea particular con facilidad, pero les resulta imposible aprender una tarea lógicamente equivalente. Parece que la capacidad de aprendizaje de un animal depende de los comportamientos cableados que ya están presentes en su cerebro. Desde este punto de vista, todos los animales son inteligentes de manera *diferente*. Simplemente no tiene sentido preguntarse si un bonobo es más brillante que una paloma mensajera: ambas criaturas poseen una inteligencia especializada que les permite tener éxito en sus entornos particulares.

Estas dos visiones aparentemente opuestas de la inteligencia —que la inteligencia general o la inteligencia *especializada* es el factor importante— son quizás sólo dos caras de la misma moneda. La lección es que, cognitivamente, los animales son similares y a la vez diferentes. En el caso de la humanidad, por mucho que nos gustaría pensar lo contrario, nuestras similitudes con otros animales son claras: simplemente no somos mucho mejores que muchos otros animales en tareas que investigan la cognición no verbal fundamental.

Sin embargo, es imposible negar la profunda diferencia que existe entre la humanidad y todas las demás especies. Puede que no estemos en la cima de alguna escala evolutiva de la inteligencia, pero *somos* la única especie capaz de construir sistemas abstractos de pensamiento. Sólo un miembro de nuestra especie puede reflexionar sobre sus propios pensamientos y los pensamientos de los demás. Sólo el Homo sapiens está en lo más mínimo interesado en definir la inteligencia o en preguntarse con precisión qué significa. De hecho, con una definición apropiada, uno puede excluir razonablemente a todas las demás especies y decir que sólo la humanidad es inteligente.

La Evolución de la Inteligencia

Si por el momento olvidamos los detalles y simplemente utilizamos una definición de trabajo "razonable" de la inteligencia a nivel humano — que implica una combinación de factores que incluyen la visión estereoscópica, el lenguaje simbólico, el uso de herramientas, etc. — entonces uno puede hacerse la importante pregunta: ¿cuán probable es que otras especies evolucionen con un alto nivel de inteligencia?

Hagamos un experimento de pensamiento. Supongamos que hace 400 millones de años un meteorito hubiera golpeado la Tierra, exterminando al antepasado de la línea de los vertebrados pero dejando intactos a los antepasados de muchas otras líneas que aún están vivas, como el calamar o la hormiga. ¿Alguna de esas líneas habría dado lugar a especies inteligentes? Por supuesto que no podemos saberlo con seguridad, porque vivimos en un mundo en el que los vertebrados no se extinguieron. Pero muchos biólogos evolucionistas piensan que es improbable que la inteligencia a nivel humano haya surgido del antepasado calamar o de la hormiga. La razón es que la evolución se aprovecha de pequeñas mutaciones aleatorias que ocurren en el

ADN genético; si el cambio resulta ventajoso para un organismo *en el aquí y ahora*, entonces el organismo es competitivamente exitoso y la mutación se propaga a través de la población. Repito: la evolución no tiene previsión. La mutación tiene que ser beneficiosa *ahora*, no en el futuro, para que los genes se propaguen. Ahora, no hay una meta hacia la cual la evolución esté trabajando; por mucho que nos guste pensar que la alta inteligencia es el pináculo de la evolución, simplemente no lo es. Por lo tanto, dado este proceso aleatorio, la probabilidad de producir la *misma* característica adaptativa compleja a partir de *diferentes* líneas evolutivas es mínima. La probabilidad de que el antepasado del calamar actual haya podido dar origen a una línea de alta inteligencia es pequeña.

Sin embargo, muchos científicos del SETI ponen sus esperanzas en el fenómeno de la *convergencia evolutiva*. A veces, diferentes líneas evolutivas llegan a la misma solución para el único problema que importa: mantener vivo a un organismo el tiempo suficiente para que transmita sus genes. El ejemplo clásico de convergencia evolutiva es el vuelo: pájaros, dinosaurios, peces, insectos, mamíferos y reptiles, todos ellos desarrollaron *independientemente* la capacidad de volar. Otro ejemplo citado con frecuencia es la racionalización de las criaturas marinas: las especies ampliamente separadas en términos evolutivos pueden, sin embargo, parecer similares. Pero se trata de convergencias con bajos niveles de complejidad. No es de extrañar que diferentes criaturas descubrieran que estar en el aire era una buena manera de escapar de los depredadores, o que especies separadas descubrieran los beneficios de cortar rápidamente a través del agua. Por lo tanto, la relevancia de estos ejemplos de convergencia para el debate de SETI es menor. Los entusiastas de SETI siempre han argumentado que un ejemplo más convincente de evolución convergente es el ojo.

El ojo es una pieza de maquinaria increíblemente compleja y especializada. Que pueda evolucionar es realmente maravilloso. Sin embargo, parece haber evolucionado independientemente al menos 40 veces, y quizás hasta 65 veces. Además, los ojos emplean al menos una docena de diseños fundamentalmente diferentes. Por ejemplo, el ojo compuesto del insecto es totalmente diferente en diseño del ojo de cámara de los vertebrados; parece que los ojos de los insectos y los vertebrados deben haber evolucionado por separado. Incluso los ojos que parecen superficialmente ser los mismos —por ejemplo, los del calamar y los del hombre— al examinarlos más de cerca muestran diferencias en los detalles. Y si se tiene en cuenta que el último antepasado común de los calamares y los humanos fue probablemente una criatura esponjosa que vivió hace quinientos millones de años... bueno, parece cierto que los dos tipos de ojos evolucionaron por separado. Que parezcan iguales es un ejemplo perfecto de evolución convergente. ¿O lo es?

En 1993, Walter Gehring y Rebecca Quiring estudiaban la genética de la mosca de la fruta.[229] Encontraron un gen —llamado *sin ojos*— que parecía actuar como un gen de control maestro para la formación de un ojo en la

mosca de la fruta. Mediante una manipulación adecuada, podían "encender el gen" en diferentes lugares y hacer que a una mosca le brotara un ojo ectópico en su ala o en su pata o en su antena. *Sin ojos* no era el gen "para" un ojo —la forma en que los genes funcionan es mucho más sutil— pero parecía, entre otras funciones, orquestar la acción de miles de otros genes que forman un ojo en el desarrollo temprano de un embrión.

Pronto se hizo evidente que el gen *sin ojos* de la mosca era similar a un gen de ratón llamado *ojo pequeño*. Un ratón con un gen defectuoso del *ojo pequeño* desarrolla ojos encogidos. Además, el gen es similar a un gen humano responsable de la enfermedad de Aniridia, cuyas víctimas pueden tener defectos en el iris, el cristalino, la córnea y la retina. Cuando los genetistas hicieron una comparación detallada se descubrió que los "genes de los ojos" en estas tres especies tan diferentes —la mosca de la fruta, el ratón y el hombre— eran esencialmente idénticos en dos lugares cruciales.

Georg Halder y Patrick Callaerts decidieron implantar el gen del *ojo pequeño* del ratón en una mosca de la fruta. El gen funcionó. Hizo que la mosca desarrollara ojos ectópicos: ojos de mosca de la fruta, no de ratón. Los ojos no estaban conectados al cerebro, pero parecían ojos compuestos de insectos normales y respondían a la luz.

Todas los *phyla* que los científicos han estudiado llevan alguna forma del gen *sin ojos*. Estos hallazgos ponen en duda la sabiduría recibida de que los ojos son un ejemplo de evolución convergente, porque si los animales realmente evolucionan el diseño de sus ojos de forma independiente, entonces uno esperaría que también hayan desarrollado su propio sistema de señalización genética. No habría ninguna razón por la que un gen de ratón pudiera controlar el desarrollo del ojo de una mosca — uno esperaría que ellos "hablaran idiomas diferentes". Quizás, entonces, el último antepasado común de *phila* tan diversos como vertebrados, cefalópodos, artrópodos y nemertinosos ya tenía un ojo y una versión del gen *sin ojos*. El jurado aún está fuera, pero parece cada vez más probable que el ojo haya evolucionado una sola vez — y los diferentes sistemas visuales que vemos a nuestro alrededor son el resultado de la evolución jugando con las variaciones de un tema existente.

Si el ojo surgió sólo una vez, entonces, ¿qué posibilidad hay de que algo aún más complejo —inteligencia de alto nivel— surja independientemente de las diferentes líneas evolutivas?

SOLUCIÓN 48: EL LENGUAJE ES EXCLUSIVO DE LOS SERES HUMANOS

... Aprendí el idioma de otro mundo.

Lord Byron,
Manfred, Acto III, Escena 4

Ludwig Wittgenstein dijo una vez que "si un león pudiera hablar, no lo entenderíamos". Es fácil ver el razonamiento del filósofo: los leones deben percibir el mundo de maneras bastante extrañas para nosotros. Poseen impulsos y sentidos que simplemente no compartimos. Por otro lado, la declaración está totalmente equivocada. Si un león hablara inglés, entonces presumiblemente los angloparlantes podrían entenderlo — pero la mente de ese león ya no sería la mente de un león. *El león ya no sería un león*. Los humanos hablan; los leones no.[230]

Algunas personas argumentan que los humanos son únicos en ser la única especie en la historia de la Tierra que ha empleado el lenguaje. Si el lenguaje se desarrollara en una sola especie — sólo una de las 50.000 millones de especies que han existido jamás — entonces podríamos inferir que la probabilidad de que el lenguaje se desarrolle es pequeña. Tal vez se desarrolló en los humanos sólo a través de la suerte tonta — un conjunto fortuito de varias adaptaciones físicas y cognitivas improbables. Somos únicos en la Tierra, y podemos ser únicos en toda la Galaxia: quizás los humanos sean las únicas criaturas que pueden hablar. Y puesto que el lenguaje abre tantas posibilidades —mucho de lo que hacemos individual y socialmente no tendría lugar en ausencia del lenguaje— las criaturas sin lenguaje seguramente no podrían construir radiotelescopios. Por muy inteligentes que sean esas criaturas, si no tuvieran idioma, no tendríamos noticias de ellas.[231]

¿Podría esto explicar la paradoja de Fermi? Tal vez muchos planetas son el hogar de la vida avanzada, pero sólo aquí en la Tierra tiene una especie que ha aprendido a hablar. A primera vista parece ser una sugerencia escandalosa, pero se vuelve más plausible al examinarla más de cerca.

* * *

Noam Chomsky, uno de los pensadores más profundos de nuestra era, ha hecho más que nadie para dilucidar la naturaleza del lenguaje humano.[232] Chomsky argumenta que el lenguaje es *innato*. Un niño no aprende el lenguaje; más bien, el lenguaje crece en la mente del niño. En otras palabras, un niño está programado genéticamente con un plano — un conjunto de reglas de proceso y procedimientos simples que hacen inevitable la adquisición del lenguaje. Todos nosotros tenemos un "órgano del lenguaje" — no algo que se pueda cortar con un cuchillo, sino un conjunto de conexiones en el cerebro

dedicadas al lenguaje de la misma manera que partes del cerebro están dedicadas a la visión. En este punto de vista, la adquisición del lenguaje le sucede a un niño de la misma manera que el vello corporal brota repentinamente en un adolescente pubescente; es parte del crecimiento. La lengua es parte de nuestra herencia genética.

Aunque las ideas de Chomsky han sido atacadas tanto por los adherentes al Modelo Estándar de Ciencias Sociales (que argumentan que las prácticas humanas dentro de un grupo social están moldeadas por la cultura del grupo) como por los filósofos (que argumentan con Chomsky por varios motivos), su teoría parece ser la única manera de explicar varios rompecabezas relacionados con la adquisición del lenguaje.

Por ejemplo, el lenguaje es un sistema infinito. Si yo dijera esta frase en voz alta, entonces es muy probable que sea la primera persona en pronunciar estas palabras en este orden en particular; es una combinación única. Uno puede construir un número infinito de oraciones a partir de un número finito de palabras. Para hacer frente a este conjunto infinito, el cerebro debe seguir las reglas en lugar de acceder a un almacén de respuestas. Y cuando uno considera lo que un niño oye cuando sus padres y hermanos le hablan — sólo una secuencia de sonidos, incluyendo "uh's" sin sentido, "huh's" y "cuchi-cu's" intercalando las frases mal formadas e incompletas que todos inevitablemente pronunciamos — es notable que los niños desarrollen y empleen gramáticas complejas tan rápidamente (todo sin el beneficio del entrenamiento, y a menudo sin retroalimentación sobre los errores que cometen). Notable, es decir, a menos que los niños estén equipados innatamente con un *dispositivo para la adquisición del lenguaje* (DAL) que les permita arrancar los patrones sintácticos relevantes de los jeroglíficos que atacan sus oídos. Sólo hay un DAL, común a toda la humanidad; no hay un dispositivo para el albanés, otro para el vasco y otro para el checo. Cualquier niño — siempre y cuando reciba suficientes estímulos para activar el DAL a la edad correcta — puede aprender a hablar cualquier idioma. El estímulo ni siquiera tiene que ser auditivo. Si se exponen a las señas a la edad adecuada, los niños oyentes de padres sordos pueden adquirir el lenguaje de señas.

El funcionamiento del DAL humano puede ser similar al del innato *dispositivo de adquisición visual* (DAV) de muchos animales. Los científicos han realizado experimentos con gatitos, vendándoles los ojos inmediatamente después del nacimiento. Si la venda se retira en cualquier momento antes de las primeras 8 semanas, se reanudará el desarrollo normal del sistema visual del gatito, y el gato adulto verá normalmente. Si la venda se mantiene puesta durante más de 8 semanas, el gato sufrirá una discapacidad visual permanente. Por lo tanto, parece que hay un periodo crítico en el que el DAV debe recibir estímulos visuales externos para establecer las conexiones neuronales adecuadas en lugares *específicos* y precableados del cerebro del gatito. Si las conexiones no se establecen dentro de este período, se pierde la posibilidad de desarrollar un sistema visual plenamente funcional. Otras partes del cerebro

no pueden actuar como paradas para el sistema visual. Se ha observado el mismo efecto en aquellos casos trágicos en los que se les niega a los niños la entrada lingüística durante el período crítico hasta la pubertad: su capacidad de hablar gramaticalmente se ve gravemente afectada. La existencia de un período crítico para la adquisición del lenguaje no es necesariamente misterioso: se presume simplemente parte del mismo proceso de maduración controlado genéticamente que hace que nuestro reflejo de succión desaparezca, nuestros dientes de leche emergen, y todos los demás cambios que ocurren en el cuerpo humano. Tiene sentido evolutivo que el DAL se encienda temprano, ya que de esa manera tenemos el máximo tiempo para disfrutar de los considerables beneficios del lenguaje. También tiene sentido que el DAL se apague cuando haya terminado su trabajo, ya que el mantenimiento del dispositivo supone unos costes considerables en términos de consumo de energía.

Aunque los diferentes idiomas difieren en sus especificidades, hay una universalidad en el lenguaje. Y son estos principios universales los que son innatos. Cuando un niño desarrolla el lenguaje, entonces, el procedimiento sigue un curso interno predeterminado. Un niño que está adquiriendo holandés establecerá los parámetros de este sistema predeterminado de una manera; el niño que está adquiriendo inglés establecerá los parámetros de otra manera; y el niño que está adquiriendo francés establecerá los parámetros del sistema de otra manera. Pero los principios subyacentes son los mismos. Para usar una analogía de software, la adquisición del lenguaje es más bien como una macro con argumentos — un argumento para cada idioma. (El vocabulario, por supuesto, debe ser aprendido: si las palabras individuales fueran innatas, entonces un neologismo como "pulsar" ¡tendría que ser asimilado en la reserva de genes antes de que los astrónomos pudieran usarlo! La evolución cultural se movería al mismo ritmo glacial que la evolución genética. También hay que aprender algunas construcciones gramaticales. Por ejemplo, hay una regla para formar los verbos con participios regulares, pero con participios irregulares o dobles debe aprenderse caso por caso.

Además de la evidencia de la lingüística y del estudio de la adquisición del lenguaje en niños, la evidencia clínica es al menos consistente con la noción de que el lenguaje es innato. En algunos pacientes desafortunados, el trauma o la enfermedad daña lugares particulares del cerebro, lugares que parecen ser responsables del procesamiento del lenguaje. Los efectos pueden ser angustiantes. Por ejemplo, a los pacientes en los que la zona de Wernicke está dañada les resulta difícil comprender el habla que les rodea. Y lo que es más extraño, sufren de afasia de Wernicke: su habla es rápida, fluida, llena de frases gramaticalmente correctas — pero su habla no tiene sentido. A menudo sustituyen una palabra por otra, y acuñan nuevas palabras; cuando se les pide que nombren objetos, dan palabras relacionadas semánticamente o palabras que distorsionan el sonido de la palabra correcta. Las transcripciones de su discurso pueden ser una lectura perturbadora, como leer las divagaciones de

un psicótico. Por otro lado, los pacientes con daños en el área de Broca sufren de afasia de Broca — el habla que es lenta, vacilante y no gramatical. A menudo pueden comprender el discurso que está sucediendo a su alrededor, o al menos hacer conjeturas informadas sobre el significado del discurso, gracias a su conocimiento previo del mundo y a la redundancia del habla incorporada. (Pueden entender una frase como "el gato persiguió al ratón" porque saben que los gatos persiguen a los ratones. Los pacientes en los que la *conexión* entre las zonas de Wernicke y Broca está dañada sufren una forma de afasia que los incapacita para repetir frases. Aún peor es la afasia que afecta a los pacientes en la que las áreas de Wernicke y Broca, y la conexión entre ellas, están intactas pero aisladas del resto de la corteza. Los pacientes pueden repetir lo que oyen pero no entienden lo que dicen; nunca inician una conversación. En otros casos, el daño a partes específicas del cerebro —a menudo a través de un derrame cerebral— causa problemas de lenguaje notablemente específicos. Algunos afásicos pueden reconocer colores pero no nombrarlos; otros no pueden nombrar alimentos, aunque saben lo que les gusta comer; otros no pueden nombrar prendas de vestir pero no tienen problemas para vestirse. En la actualidad, los neurocientíficos no pueden cartografiar el cerebro y destacar las diferentes áreas en las que se manejan los diferentes aspectos del lenguaje. Sin embargo, la evidencia es que el lenguaje está localizado. Y aunque la localización en sí misma no significa que el lenguaje sea innato, sí sugiere que tenemos un órgano del lenguaje.[233]

Si poseemos una facultad innata del lenguaje, entonces la pregunta obvia es: ¿cómo llegamos a tener un órgano tan intrincado y complejo? La respuesta es igualmente obvia: evolucionó por selección natural de variaciones hereditarias. A menos que invoquemos la participación de un creador, la selección natural es el único proceso conocido que puede generar estructuras tan maravillosas. Pero si nuestro órgano lingüístico es el resultado de la evolución, ¿no deberíamos ver rastros de él en los simios? Después de todo, somos descendientes de simios, ¿no? Bueno, no, no lo estamos. Los humanos y los simios están unidos por un antepasado común que quizás vivió hace 7 millones de años. Es totalmente posible que nuestro DAL haya evolucionado en algún momento en los últimos 7 millones de años, por lo que no es compartido con la rama evolutiva que conduce a los simios modernos. De hecho, se ha sugerido que las mentes de los primeros humanos modernos de hace unos 100.000 años contenían varios "módulos" separados: un módulo para el lenguaje, un módulo para la inteligencia técnica, un módulo para la inteligencia social, un módulo para la historia natural, etc. Puede ser que estos módulos aislados comenzaron a comunicarse hace sólo 50.000 años; y sólo entonces la gente pudo reunirse en grupos y discutir, por ejemplo, los méritos de un nuevo diseño de herramientas para su uso en la caza. (Tal vez fue sólo entonces cuando la conciencia humana, tal como la entendemos ahora, se desarrolló. Sólo entonces nos volvimos plenamente humanos.

* * *

Los seguidores de Chomsky argumentarían que el lenguaje es específico de la especie humana. Si quieres entender a otros animales, estudia lo que hacen mejor; pero no tiene sentido estudiar sus capacidades lingüísticas, ya que el lenguaje es una habilidad específica del ser humano. Los cerdos no vuelan, ni hablan.

¿Pero estamos seguros de que somos únicos? ¿Qué pasa con los chimpancés, o los delfines, o las abejas danzantes — no se comunican a su manera? Tal vez ellos también tienen habilidades innatas en el lenguaje. Una de las dificultades a la hora de contemplar estas cuestiones es nuestro lenguaje: parecemos obligados a antropomorfizarnos. Incluso cuando describimos objetos inanimados que antropomorfizamos: los genes son "egoístas", el coche "actúa de forma graciosa", mi programa de ajedrez "averigua" cuál es el mejor movimiento a hacer. Por supuesto, no hay nada malo en emplear metáforas —asignar intencionalidad a objetos inanimados nos permite transmitir el pensamiento apropiado rápidamente-, pero a veces podemos olvidar que los enunciados antropomórficos no necesariamente describen lo que realmente está sucediendo. Tenemos que ser cuidadosos al describir las acciones de un animal en términos de nuestros propios pensamientos y motivos conscientes. Cuando describimos a un animal como comunicando alguna palabra o idea — efectivamente, cuando decimos que está "hablando" — podríamos estar completamente equivocados.

He aquí un ejemplo en el que nuestra primera interpretación de los acontecimientos puede ser errónea. Algunos tipos de ardillas terrestres que viven en campo abierto sufren dos depredadores principales: los halcones, que dependen de la velocidad, atacan desde el aire, mientras que los tejones, que dependen del sigilo, atacan desde el suelo. Cuando una ardilla detecta un depredador, elige (¡hay un uso antropomórfico!) de una de las dos estrategias defensivas. Si ve un tejón, entonces la ardilla se retira a la abertura de su madriguera y mantiene una postura erguida. Un tejón, viendo esa postura, sabe que la ardilla la ha visto y por lo tanto un ataque sería una pérdida de tiempo y energía. Si una ardilla ve un halcón, entonces corre como el demonio hacia la cubierta más cercana. Las ardillas también emiten dos sonidos de alarma diferentes. Si ven a un tejón, entonces hacen un sonido áspero y parlanchín; si ven a un halcón, entonces emiten un silbido agudo. Otras ardillas en la vecindad reaccionan cuando escuchan los sonidos, retirándose a sus madrigueras cuando escuchan la alarma de tejón o corriendo en busca de refugio cuando escuchan la alarma de halcón. Nuestra inclinación natural es pensar que las ardillas se están comunicando entre sí; que están diciendo en efecto: "Cuidado, ahora, hay un tejón alrededor; mejor dirígete a casa" o "Oh-oh, halcón; ¡*sal* de aquí!" ¿Pero lo son?

Como lo demuestran claramente sus acciones al observar a un depredador, cualquier ardilla individual está interesada en salvar su propio pellejo. De

hecho, la teoría evolutiva nos dice que éste debe ser el caso: a una ardilla no le podría importar menos el destino de otras ardillas. Pero si las llamadas de alarma de la ardilla llevan información semántica — si están gritando "¡brock! O ¡halcón! en ardillense, es una paradoja. La selección favorecerá a las ardillas que se callan, se escabullen silenciosamente y dejan que se coman a los otros mamones; ser un no llamador en un grupo de personas que llaman es selectivamente ventajoso, y la ardilla puede transmitir sus genes. Pronto, sin embargo, terminas con una comunidad de ardillas silenciosas; ¿de dónde surge el instinto de gritar? El comportamiento de las ardillas tiene sentido sólo si sus llamadas *no* transmiten información semántica. Considere la "alarma de halcón" de la ardilla. En primer lugar, es un silbato agudo — que, como han demostrado los experimentos, los halcones encuentran difícil de localizar. Así que la ardilla no le está revelando nada al halcón. En segundo lugar, ser el único que corre a esconderse hace que una ardilla llame la atención; es mucho mejor ser uno de un grupo de ardillas que están corriendo alrededor, porque las posibilidades de ser señalado por el halcón se reducen. De manera similar, las ardillas que corren a esconderse cuando oyen un silbido agudo son menos propensas a ser devoradas por un halcón que las ardillas que se mantienen firmes. Por lo tanto, la selección tenderá a favorecer a las ardillas que gritan cuando ven un halcón, y también a las que corren para cubrirse cuando oyen un silbido agudo. Cuando los *humanos* miran la situación la interpretan como ardillas compartiendo información. Pero eso no es lo que está sucediendo. El comportamiento es simplemente un rasgo que se transmite de generación en generación porque es efectivo. Las ardillas ni siquiera tienen que ser conscientes unas de otras para que este tipo de comportamiento evolucione. Sin palabras, sin lenguaje, sólo las fuerzas de la evolución. Un análisis similar se puede aplicar al famoso caso de los monos vervet, que tienen "avisos de alarma" para águilas, leopardos y pitones.

¿Pero qué hay de chimpancés como Washoe y bonobos como Kanzi, a los que se les ha enseñado el Lenguaje de Señas Americano (LSA)? ¿Acaso los logros de estas criaturas prueban que algunos animales tienen la capacidad de hablar? Incluso aquí debemos tener cuidado. El equipo de científicos que entrenó a Washoe durante tres años afirmó al final del programa que el chimpancé podía usar 68 signos, e incluso encadenar algunos de ellos en oraciones de dos y tres palabras. Herbert Terrace, un científico que estaba fascinado con la idea de comunicarse con otra especie, buscó replicar los experimentos. Él crió al chimpancé Nim Chimpsky (¡la razón del nombre debe ser obvia!) en un ambiente altamente social y le enseñó un conjunto de signos de LSA. Terrace grabó en video las sesiones de señas y, después de analizar los datos de estas sesiones, completó la mayor parte de un libro que describía el éxito de Nim en la adquisición del lenguaje de señas. Luego, cuando repitió las cintas en cámara lenta para un análisis final, Terrace hizo un descubrimiento: casi todos los signos de Nim fueron provocados por sus maestros humanos. Además, las señales de los chimpancés eran a menudo una

imitación de lo que sus maestros acababan de firmar. Nim nunca fue espontáneo con su firma; las señales fueron hechas para obtener recompensas de sus maestros (e incluso entonces, recurrió a las señales sólo después de que hubieran fallado métodos más directos para obtener una recompensa). En resumen, Nim no mostró nada como el lenguaje completo. Cuando los científicos escudriñaron las cintas de Washoe a disposición del público, quedó claro que lo mismo había sucedido: el chimpancé estaba imitando las señales que un entrenador acababa de hacer. Tal vez la crítica más fuerte al experimento de Washoe vino del usuario nativo de LSA en el equipo. Recordó cómo los científicos registraban como señal cada movimiento vago que hacía Washoe, a pesar de que el gesto podía parecerse a una señal de LSA no válida. La conclusión de los científicos fue un caso de ilusión. En un caso similar con un gorila llamado Koko, su entrenador explicó los muchos errores de Koko llamándolos metáforas y mentiras traviesas. Si usted toma ese enfoque para el análisis de datos, usted puede encontrar cualquier cosa. Incluso en el caso de Kanzi, un animal que indudablemente muestra impresionantes habilidades cognitivas, hay que tener mucho cuidado de no sobreinterpretar lo que hace. No importa lo generosos que seamos, simplemente no podemos argumentar que Kanzi usa el lenguaje en algo como la forma en que los humanos lo usan.

Usar un sistema de recompensas para entrenar a chimpancés cautivos es una cosa, pero lo que los chimpancés hacen en la naturaleza es otra. No hay absolutamente ninguna indicación de que los chimpancés —o cualquier otra criatura— usen el lenguaje espontáneamente. Muchas otras evidencias sugieren que los animales no poseen un lenguaje simbólico. Por ejemplo, en un experimento reciente los científicos liberaron un delfín en un extremo de una piscina que contenía un aparato que (una vez que el delfín había descubierto cómo funcionaba) liberaba alimento. Los investigadores midieron el tiempo que le tomaba al delfín entender cómo funcionaba el aparato, y luego lo transfirieron al otro extremo de la piscina. Una barrera impedía que el delfín volviera a nadar hacia el aparato, pero aún así podía ver el aparato y enviar señales a través del agua. Los científicos liberaron un segundo delfín en la piscina cerca del aparato. En promedio, el segundo delfín tardó el mismo tiempo en operar el aparato que el primero. Podemos concluir de esto que el primer delfín no pudo decirle al segundo cómo funcionaba el aparato. Los delfines carecen de un lenguaje abstracto. Un experimento similar con chimpancés tuvo los mismos resultados: los chimpancés no podían comunicar sus conocimientos.

Como prueba final de que nuestros parientes carecen de una capacidad innata para el lenguaje, consideremos lo que sucede cuando los científicos extirpan las áreas del cerebro de un mono correspondientes a las áreas de Broca y Wernicke en humanos: la capacidad del mono para producir o responder a las llamadas vocales no se ve afectada.

Aunque la sugerencia de que sólo los seres humanos poseen un lenguaje

simbólico puede ser polémica, muchas personas (incluido yo mismo, por si sirve de algo) piensan que es evidentemente el caso. Incluso si podemos entrenar a ciertos animales para que usen palabras, ningún animal se acerca a usar el lenguaje en la forma abstracta, espontánea, juguetona y creativa en que los humanos usan el lenguaje. Parece tonto negar el hecho. También parece arrogante y antropocéntrico medir las habilidades de los animales en términos de *nuestras* capacidades. Las aves pueden realizar hazañas de navegación que ningún ser humano puede igualar sin ayuda. Algunos animales marinos pueden, a diferencia de los humanos, sentir corrientes eléctricas. Los perros pueden oír sonidos más allá de nuestra percepción y oler olores a los que nuestras narices están muertas. Los murciélagos usan un increíble sistema de ecolocalización. Se sabe que los caballos captan señales que los humanos no captan por completo. Y así sucesivamente. Todas las especies tienen habilidades, forjadas por la evolución, que les permiten ganarse la vida en un mundo al que no le importa si sobreviven o no. Esta diversidad es maravillosa y debe ser celebrada. Definir otras especies en términos de cuán bien o cuán mal usan los rasgos humanos es degradar a esas especies.

* * *

El habla articulada es de vital importancia para el éxito de nuestra especie. Tal vez sea imposible para cualquier especie desarrollar la capacidad de viajar o comunicarse a través de distancias interestelares si carecen de algún método igualmente sofisticado de comunicación. Y sin embargo, en el caso de la evolución del habla humana, parece que nos vemos obligados a concluir que el habla articulada es el resultado de una serie de cambios ambientales fortuitos y respuestas evolutivas; fue sólo buena suerte. Consideremos, por ejemplo, lo que sucedió con los cuerpos de nuestros antepasados: una reestructuración del diafragma humano, la laringe, los labios, los conductos nasales, la cavidad oral y la lengua, todos los cuales eran vitales para el desarrollo del habla articulada, pero ninguno de ellos ocurrió *para que* el habla se desarrollara. Los cambios en estos órganos inicialmente no tenían nada que ver con la capacidad para hablar; eran pequeños cambios que traían beneficios selectivos inmediatos. Al menos uno de los cambios — la posición de la laringe en el fondo de la garganta — parece extraño. Tener una laringe baja en la garganta proporciona a la lengua suficiente espacio para moverse y producir un gran número de sonidos vocálicos, pero cualquier alimento y bebida que traguemos tiene que pasar por encima de la tráquea: el ahogamiento hasta la muerte se convierte en una posibilidad evidente. Si la cinta de la vida se repitiera, quizás los humanos no desarrollarían el lenguaje. Los beneficios son grandes, pero también lo son los costos.

En la Tierra, de los 50 mil millones de especies que han existido, sólo los humanos poseen el lenguaje. El lenguaje nos permite no sólo pensar, sino también pensar en los pensamientos que tenemos. Nos permite reflexionar sobre nuestros pensamientos, probar nuevos patrones de pensamiento y

registrar nuestros pensamientos. El lenguaje es lo que nos hace humanos. Si alguna vez visitamos otros mundos, quizás encontremos miles de millones de otras especies — cada una bien adaptada a su nicho particular, pero ninguna con el único rasgo adaptativo que estamos buscando: el lenguaje.

SOLUCIÓN 49: LA CIENCIA NO ES INEVITABLE

Porque la ciencia es como la virtud, es su propia gran recompensa.

Charles Kingsley,
Salud y Educación

Para que una CET pueda comunicarse con nosotros, presumiblemente tendrá que poseer un alto nivel de conocimientos científicos. Porque sólo a través de la ciencia comprenderá cómo construir un radiotelescopio (o algún otro dispositivo que permita la comunicación interestelar). Pero aunque una especie extraterrestre inteligente aprenda a fabricar herramientas, desarrolle tecnología y adquiera lenguaje, ¿desarrollará inevitablemente los métodos de la ciencia natural?

Anteriormente estudiamos una solución a la paradoja de Fermi que sugería que las CETs podrían desarrollar una ciencia o matemática *diferente*. Aquí la sugerencia es ligeramente diferente: quizás sólo hay un enfoque de la ciencia, pero hasta ahora sólo los humanos la han encontrado. Quizás la Galaxia está plagada de especies más inteligentes que nosotros — criaturas que sobresalen en las artes y la filosofía — pero que carecen de las técnicas de la ciencia. Por lo tanto, no sabemos nada de estas especies porque no pueden hacerse oír en distancias interestelares. "Ellos" —que significa, como siempre, civilizaciones inteligentes comunicantes— no existen.

Aquellos que ofrecen esto como una resolución de la paradoja — y está implícito en miles de historias del SF — presuntamente toman como referencia el desarrollo histórico de las ciencias naturales en la Tierra. Muchas civilizaciones desarrollaron las matemáticas y la medicina, pero los orígenes de las ciencias naturales eran mucho más restringidos. Consideremos, por ejemplo, a los aborígenes. Hallazgos recientes indican que los aborígenes pueden haber llegado a Australia hace 50.000 años, un logro histórico en la historia de la humanidad que lamentablemente está subestimado. La cultura de los pueblos indígenas de Australia es quizás la cultura más antigua que se mantiene continuamente en el mundo; sus historias y sistemas de creencias son los más antiguos de la Tierra. Han vivido en una amplia gama de entornos con gran éxito durante un periodo de tiempo inimaginable. Sin embargo, en todo ese tiempo nunca desarrollaron las técnicas de la ciencia moderna. Parece que la ciencia no es inevitable. El amanecer de la ciencia moderna sólo comenzó hace unos 2500 años con los griegos; pero, a pesar de poseer algunos de los científicos más brillantes de todos los tiempos, la ciencia helenística era limitada. Estaba encadenado por un esnobismo intelectual dominante que valoraba más la contemplación que la experimentación. La ciencia, tal como la entendemos ahora, tardó casi 2.000 años en ponerse en marcha, y científicos como Galileo, y en particular Newton, fueron pioneros en un enfoque cuantitativo del razonamiento científico. ¿Por qué tomó tanto

tiempo para que las semillas plantadas por los griegos florecieran en nuestros esfuerzos científicos modernos? Y aunque la ciencia es ahora una actividad global, ¿por qué la floración tuvo lugar en una zona geográfica tan restringida?

Después de la desaparición de la antigua civilización griega, muchas otras civilizaciones desarrollaron sofisticadas tecnologías y sistemas de matemáticas. Las civilizaciones árabes del norte de África y Oriente Medio poseían excelentes matemáticos (gran parte de nuestro conocimiento de la astronomía griega fue preservado por ellos). Las civilizaciones de América del Sur tenían arquitectos que construyeron estructuras fantásticas. La civilización china fue durante muchos cientos de años la más avanzada de la Tierra. Sin embargo, ninguna de ellas —ni ninguna de las otras civilizaciones alrededor del mundo— desarrolló los métodos de la ciencia moderna, y ninguna de ellas desarrolló el enfoque científico para el estudio de la Naturaleza, que ha demostrado ser tan poderoso. ¿Por qué?

Puede ser que los factores culturales hayan jugado un papel. Por ejemplo, algunos autores creen que la filosofía predominante de la civilización china alentaba una visión "holística" del mundo, por lo que les resultaba más difícil adoptar un enfoque "analítico" occidental de la ciencia. Newton estaba listo para considerar un sistema aislado del resto del Universo y aplicar sus técnicas a ese sistema idealizado y simplificado. Si hubiera intentado proporcionar una descripción completa de la naturaleza en toda su desordenada complejidad holística, seguramente no habría tenido éxito. Y en 1709, mientras el mundo todavía estaba absorbiendo el impacto de los grandes libros científicos de Newton, la chispa que encendió la revolución industrial — el uso de Abraham Darby del coque en lugar del carbón para fundir hierro — tuvo lugar en Ironbridge, Inglaterra. Al mismo tiempo, en China se estaba cerrando una fábrica de hierro de siglos de antigüedad. Los chinos pensaron que ya no la necesitaban.

Algunos autores, entonces, argumentan que el desarrollo de la ciencia está lejos de ser inevitable. Hay una variedad de razones — suerte, obstáculos ambientales, factores culturales, inclinación filosófica — por las que las CETs podrían no golpear las técnicas de la ciencia.

Sin embargo, es difícil aceptarlo como una explicación plausible de la paradoja de Fermi. Sí, tomó casi 2000 años entre el surgimiento de la ciencia helenística y el surgimiento de la ciencia moderna. Esto es mucho tiempo a escala humana, pero recuerden como siempre que esta no es la escala de tiempo correcta para considerar estas cuestiones. En el Año Universal, 2000 años corresponden a 5 segundos. En una escala de tiempo cósmica no importa en absoluto que la ciencia natural haya sido desarrollada por una civilización de Europa Occidental y no por los Incas, los Otomanos o los Chinos. Si la humanidad hubiera necesitado otros 2000 años (o 20.000 años) para inventar la ciencia, poco cambiaría en lo que respecta a la paradoja de Fermi.[234] El método científico sólo tuvo que ser inventado una vez: fue tan eficaz que se

extendió rápidamente, y ahora es el patrimonio común de nuestra especie. ¿No deberíamos esperar que ocurra lo mismo con las CETs?

6

Conclusión

Después de criticar 49 resoluciones de la paradoja de Fermi, es justo que presente la mía. No es una sugerencia original, pero resume lo que siento que la paradoja puede estar diciéndonos sobre nuestro Universo.

David Brin, en su magnífico análisis de 1983 del "gran silencio"[235], escribió que "pocos temas importantes son tan pobres en datos, tan sujetos a extrapolaciones injustificadas y sesgadas —y tan atrapados en el destino final de la humanidad— como éste". Casi dos décadas después, poco ha cambiado.

El tema *sigue* siendo importante. ¿Qué podría ser más? O estamos solos, o compartimos el Universo con criaturas con las que algún día podríamos comunicarnos. De cualquier manera, es un pensamiento asombroso.

El sujeto *sigue* siendo pobre en datos. Sin duda, ha habido avances en áreas específicas. Los avances en computación y tecnología astronómica han hecho posible el desarrollo de poderosos programas SETI, y ahora sabemos mucho más acerca de la formación de sistemas planetarios y de la evolución de la vida en la Tierra (aunque en ambos casos, como es usual en la ciencia, los nuevos descubrimientos parecen crear una creciente capa de ignorancia). Sin embargo, apenas hemos empezado a encontrar respuestas a muchas de las preguntas profundas. Y el tema *sigue* siendo objeto de extrapolaciones injustificadas y sesgadas. Sin embargo, dada la profunda importancia del tema, ¿debería nuestra falta de datos concretos obligarnos a guardar silencio? Sin duda, lo mejor que podemos hacer en estas circunstancias es ser francos con respecto a nuestros prejuicios y abiertos con respecto a nuestras extrapolaciones. Al menos entonces puede tener lugar un debate, aunque por el momento dicho debate genere más calor que luz.

SOLUCIÓN 50: LA PARADOJA FERMI RESUELTA....

Cuando los hechos son pocos, es más probable que las especulaciones representen la psicología individual.

Carl Gustav Jung

¿La paradoja está resuelta? Bueno, en realidad no. El tema sigue siendo tan intangible que las personas honestas pueden llegar a conclusiones opuestas. El lector es libre de elegir una de las soluciones presentadas anteriormente, o de crear la suya propia. Sin embargo, aquí presento la solución que tiene más sentido para mí.

* * *

Sólo hay un hecho brillante y duro en todo el debate: no hemos recibido visitas de las CETs, ni hemos tenido noticias de ellas. Hasta ahora, el Universo permanece en silencio para nosotros. Aquellos que negarían este hecho, por supuesto, tienen una solución a la paradoja de Fermi (y presumiblemente dejaron de leer este libro después de las primeras páginas). El trabajo para el resto de nosotros es interpretar este hecho solitario.

Como sugiere la cita anterior, con sólo una pieza de evidencia con la que jugar, nuestros prejuicios saldrán a la luz. Mis propios prejuicios, tal como los puedo identificar, incluyen el optimismo sobre nuestro futuro. Me gusta pensar que nuestro conocimiento científico continuará expandiéndose y que nuestra tecnología mejorará; me gusta pensar que la humanidad algún día llegará a las estrellas, primero enviando mensajes y luego, quizás más tarde, enviando naves. Me gusta pensar que algo parecido a la civilización que abarca la galaxia descrita por Asimov en sus historias clásicas de la *Fundación* podría suceder algún día. Pero estos sesgos chocan con la paradoja de Fermi: si *vamos* a colonizar la Galaxia, ¿por qué *ellos* no lo han hecho ya? Han tenido los medios, los motivos y la oportunidad de establecer colonias, pero parece que no lo han hecho. ¿Por qué?

De las sugerencias discutidas en el Capítulo 4, sólo las Soluciones 16, 17 y 20 me parecen resoluciones plausibles de la paradoja; sospecho que la mayoría de los científicos del SETI estarían de acuerdo en que es probable que alguna combinación de estas ideas sea correcta. (Estrictamente, estas son soluciones a la pregunta del "gran silencio": ¿por qué no *escuchamos* de las CETs? Para explicar por qué las CET no nos han visitado, o por qué no vemos ninguna prueba de su existencia, debemos tener en cuenta otras sugerencias: que los viajes interestelares son imposibles, por ejemplo. Pero la única posición que es consistente con la ausencia observada de extraterrestres y que al mismo tiempo apoya mis prejuicios — la única resolución de la paradoja de Fermi que tiene sentido para mí es que estamos solos.

* * *

Si miras al cielo en una noche despejada sin luna y miras a simple vista las miríadas de estrellas y la inmensidad del espacio, es difícil creer que podamos estar solos. Somos demasiado pequeños y el Universo es demasiado grande para que esto tenga sentido. Pero las apariencias pueden ser engañosas: incluso bajo condiciones ideales de observación es poco probable que se vean más de 3000 estrellas, y pocas de ellas proporcionarían condiciones hospitalarias a nuestra forma de vida. La reacción visceral que quizás todos sentimos cuando miramos al cielo nocturno —que debe haber vida inteligente en alguna parte— no es una buena guía. Tenemos que guiarnos por la razón, no por una reacción visceral, a la hora de debatir este asunto. Bueno... la razón nos dice que hay unos pocos cientos de miles de millones de estrellas sólo en nuestra Galaxia, y quizás cientos de miles de millones de galaxias en el Universo. ¿Sólo una especie sensible cuando hay un número tan inmenso de lugares donde la vida podría comenzar? *Vamos*... seguramente no puedo hablar en serio.

Al discutir algunos de los diferentes tipos de paradojas, noté la observación de Rapoport de que el choque de una paradoja puede obligarnos a descartar un viejo (quizás cómodo) marco conceptual. Creo que la paradoja de Fermi proporciona un choque que nos obliga a examinar la noción generalizada de que el gran número de planetas existentes es suficiente para garantizar la existencia de vida inteligente extraterrestre. De hecho, no debemos sorprendernos demasiado. La ecuación de Drake es un producto de varios términos. Si uno de esos términos es cero, entonces el producto de la ecuación de Drake será cero; si varios de los términos son pequeños, entonces el producto de la ecuación de Drake será muy pequeño. Estaremos solos.

Si un factor en la ecuación de Drake es cercano a cero, entonces podemos identificar razonablemente ese factor como la solución a la paradoja de Fermi. Por ejemplo, como vimos en la Solución 30, algunos científicos argumentan que el surgimiento de la vida fue una casualidad casi milagrosa, un evento 1 en 10^{100} (un número que empequeñece el número de planetas en el Universo, y cuando se expresa como probabilidad se vuelve, por razones prácticas, indistinguible de cero).

Otros científicos argumentan, quizás de manera más convincente, que la improbabilidad de la transición procariota-eucariota (Solución 44) explica la paradoja. Sin embargo, más que una solución única a la paradoja, sospecho que hay una combinación de factores —producto de varias soluciones que hemos discutido en este libro— que dan como resultado la singularidad de la humanidad.

Es usual en este punto escoger algunos números favorables a la posición de uno, enchufarlos en la ecuación de Drake, y luego presentar el resultado requerido. Preferiría presentar aquí un enfoque más pictórico.

* * *

Cuando era un colegial, estaba fascinado por la Criba de Eratóstenes.[236] Eratóstenes era un astrónomo y matemático griego, famoso por ser el jefe de la Biblioteca de Alejandría y por ser el primero en proporcionar una medida precisa de la circunferencia de la Tierra. También desarrolló una técnica —su "criba"— para encontrar todos los números primos menos que algún número dado *N*. Los números primos —números divisibles uniformemente sólo por sí mismos y 1— son extremadamente importantes en matemáticas; son como átomos, a partir de los cuales podemos componer todos los demás números a través de la multiplicación. Si se le asigna un número al azar, puede ser difícil saber si es compuesto o primo. La Criba de Eratóstenes es una técnica para tamizar los números compuestos y dejar sólo los números primos en pie.

Suponga que usted es un matemático griego que quiere encontrar todos los primos menores o iguales a 100. Primero, se toma una hoja de papiro y se anotan los números del 1 al 100. El número 1 es especial, así que ignóralo. El número 2 es primo así que déjalo; pero revisa la lista y tacha todos sus múltiplos: 4, 6, 8, ... 100. Repita el proceso, usando el siguiente número restante más pequeño, 3; déjelo porque es primo, pero tache sus múltiplos hasta el 99. Continúe hasta que llegue al final de la lista. Sorprendentemente rápido, todos los números de hasta 100 han sido borrados — excepto los 25 números primos, que todavía están en pie. Incluso para una computadora, la criba de Eratóstenes es la manera más rápida de encontrar todos los primos menos de cerca de 10^8.

Cuando era un colegial, estaba intrigado por la forma en que la criba atrapaba más y más de los grandes números. La técnica era inexorable: en grandes cuadrículas me encontraba cortando número tras número. Debido a que la distribución de los primos se adelgaza rápidamente cuanto más alto se cuenta, hay tramos largos donde todos los números han sido tachados — números que no han logrado pasar a través del tamiz.

FIGURA 72. Esta figura muestra lo que sucede cuando se aplica el tamiz de Eratóstenes a una cuadrícula de números de hasta 100. Los números en negrita son primos que se dejan sin tocar por el procedimiento. Las cajas grises son números compuestos tachados, aquellos que pueden ser creados multiplicando dos o más números primos. El subíndice en un número compuesto indica el divisor más pequeño del número — el primer primo que tamiza el número. El número 1 es especial, y no se considera primo.

Me imagino que algo similar está pasando con la paradoja de Fermi. Imaginen escribir una cuadrícula de números, del 1 al 1.000.000.000.000.000, con cada número representando un planeta individual en la Galaxia. (Llego a este número multiplicando el número de estrellas en la Galaxia, que es aproximadamente 10^{11}, con un promedio supuesto de 10 planetas por estrella.

De hecho, el número de estrellas es probablemente mayor que esto, con algunas estimaciones que sugieren que nuestra Galaxia contiene hasta 400 mil millones de estrellas. Por otro lado, el número promedio de planetas por estrella es probable que sea inferior a 10. Así que aunque una cifra de 10^{12} planetas es una suposición aproximada, puede que no sea demasiado errónea — y de todos modos, esto no importa cuando todos los otros números en el problema son tan vagos. Asignamos a la Tierra el número 1, ya que la Tierra es especial: es el único planeta en el que *sabemos* que existe vida inteligente. Ahora comience a aplicar un tamiz — llamémoslo la Criba de Fermi. (El proceso que describo aquí no pretende ser la única manera de trabajar los números. Puede que prefieras diferentes valores numéricos para las cantidades que describo, pero el proceso muestra por qué no deberíamos sorprendernos si descubrimos que estamos solos.

* * *

Paso 1 En la Solución 36 discutimos brevemente la noción de una zona galáctica habitable (ZGH) en la que una estrella debe residir antes de que pueda dar lugar a un sistema planetario viable. Una sugerencia reciente es que la ZGH contiene sólo el 20% de las estrellas en la Galaxia. Por lo tanto, tache los números correspondientes a los planetas que no orbitan una estrella en la ZGH: con 10 planetas por estrella, quedan 2×10^{10} planetas. Ahora haga una segunda aplicación del tamiz.

Paso 2 Las brillantes estrellas O y B mueren demasiado rápido para que la vida evolucione a su alrededor; las aburridas estrellas K y M son demasiado avaras con su energía para que la vida prospere. Para la vida tal como la conocemos, necesitamos considerar sólo estrellas como el Sol. (Como subrayé en secciones anteriores, esta suposición puede ser una expresión de chovinismo — o un fracaso de la imaginación científica. Pero creo que es la mejor suposición que podemos hacer en este momento. Sólo alrededor del 5% de las estrellas en nuestra Galaxia son como el Sol; tache los números correspondientes a planetas que no orbitan una estrella similar al Sol, y quedan 10^8 planetas.

Paso 3 La vida tal como la conocemos requiere que un planeta terrestre permanezca en la zona continuamente habitable (ZCH) durante miles de millones de años. Discutimos el estrecho ancho de la ZCH en la Solución 36. También discutimos algunos factores que pueden causar que los planetas similares a la Tierra sean más raros de lo que suponemos, tales como la migración de Júpiter a las partes internas de un sistema planetario (Solución 37) y la posible escasez de planetas rocosos (Solución 35). Mi propia suposición es que sólo el 1% de los planetas serán aptos para la vida y permanecerán en una ZCH durante miles de millones de años. Usted puede pensar que una cifra diferente está en orden aquí (y uno podría argumentar a favor de cifras más altas o más bajas), pero el 1% me parece razonable. Así

que tache los números correspondientes a planetas que no permanecen en un ZCH: 10^6 planetas permanecen.

Paso 4 De los millones de planetas que orbitan en la ZCH de una estrella similar al Sol que está en la ZGH, ¿cuántos son el hogar de la vida? Si usted cree que la génesis de la vida es excepcionalmente rara (Solución 30), entonces la respuesta es: ninguna. Si usted cree que se requiere un conjunto especial de circunstancias, tales como que la vida se origine en un planeta como Marte y luego sea transportada por medio de eyectas de impacto a un planeta similar a la Tierra (Solución 43), entonces la respuesta es: no muchos. Prefiero creer que la vida es un acontecimiento probable: que si las condiciones son adecuadas, entonces hay una buena posibilidad de que las células evolucionen. Digamos que la probabilidad es de 0,5. Tachar los números correspondientes a los planetas en los cuales la vida no se levanta, y quedan 5×10^5 planetas. ¡Medio millón de planetas con vida!

Paso 5 El Universo es un lugar peligroso. Vimos cómo la destrucción puede venir de las profundidades del espacio (Solución 39) y de más cerca de casa (Solución 40). También discutimos cómo la tasa de desastres planetarios puede ser significativa (Solución 38). En muchos planetas, la vida puede ser apagada — o al menos impedida de evolucionar hacia formas de vida complejas — por algún desastre. Mi suposición es que hasta el 20% de los planetas pueden sufrir ese destino. (Esto es sólo una suposición, y puede ser una sobreestimación.) Por lo tanto, tache las cifras correspondientes a los planetas en los que ocurre un desastre: Quedan 10^5 planetas.

Paso 6 Vimos cómo el sistema de placas tectónicas de la Tierra era importante en el desarrollo de la vida (Solución 41) y también cómo la Luna juega un papel (Solución 42). Si ambos factores son necesarios para la evolución de la vida compleja, entonces el número de planetas con las especies sensibles que estamos buscando puede ser pequeño. Sin embargo, aunque creo que estos fenómenos son importantes en cierto modo, no tengo idea del número de personas implicadas. Así que voy a ignorar estos factores, y en esta etapa del proceso de cribado todos los planetas pasan a través de: 10^5 planetas todavía quedan.

Paso 7 Tache los números correspondientes a planetas donde la vida nunca evoluciona más allá del grado procariota (Solución 44). El desarrollo de la moderna célula eucariota tomó eones en la Tierra, lo que quizás indica que este paso está lejos de ser inevitable. Nadie sabe qué fracción de planetas con procariotas pasarán a albergar formas de vida multicelulares complejas; mi propia estimación de uno de cada diez puede ser muy generosa. Nos quedamos con 10^4 números — diez mil planetas que poseen vida multicelular compleja. ¿Eso significa que la Galaxia contiene diez mil CETs? Desafortunadamente no, porque debemos hacer varias aplicaciones más de la Criba antes de llegar al número de especies con las que podemos comunicarnos. Combinemos todo esto en un último paso a través del proceso

de tamizado.

Paso 8 Tache los números correspondientes a planetas en los que las formas de vida avanzadas no desarrollan el uso de herramientas y la capacidad de mejorar continuamente su tecnología (Soluciones 45 y 46). Tache los números correspondientes a planetas en los que las formas de vida avanzadas no desarrollan el tipo de inteligencia abstracta de alto nivel con el que estamos familiarizados (Solución 47). Finalmente, y en mi opinión crucial, tache los números correspondientes a planetas en los que las formas de vida avanzadas no desarrollan un lenguaje gramatical complejo (Solución 48). ¿Cuántos planetas quedan? Por supuesto, nadie lo sabe; es imposible asignar probabilidades exactas a estos asuntos. Mi sensación es que muchos de estos desarrollos estaban lejos de ser inevitables. El sentimiento surge porque, de los 50 mil millones de eventos de especiación en la historia de nuestro planeta, sólo uno condujo al lenguaje — y el lenguaje es la clave que permitió que todos nuestros otros logros tuvieran lugar. Mi propia conjetura, entonces, es que ninguno de los planetas pasa por este proceso final de cribado.

Después de aplicar el tamiz de Fermi creo que todos los números de cuadrícula serán tachados, excepto el número 1. Sólo queda la Tierra. Estamos solos.

* * *

Creo que la paradoja de Fermi nos dice que la humanidad es la única especie sabia y sensible en la galaxia. (Probablemente también somos únicos en nuestro Grupo Local de galaxias, ya que es poco probable que muchas galaxias de Grupos Locales posean una ZGH. Quizás incluso somos únicos en todo el Universo — aunque la velocidad finita de la luz significa que las CETs podrían existir ahora en galaxias muy distantes sin que nosotros todavía seamos conscientes de ellos. Sin embargo, la Galaxia no necesita ser estéril. La imagen que tengo es la de una galaxia en la que la vida simple no es infrecuente; la vida compleja y multicelular es mucho más rara, pero no desaparece. Puede haber decenas de miles de biosferas excepcionalmente interesantes en la Galaxia. Pero sólo *un* planeta — la Tierra — tiene formas de vida inteligentes.

Tal imagen es a menudo criticada por violar el Principio de Mediocridad. La imagen parece sugerir que la Tierra, y la humanidad, son especiales. ¿No es este el colmo de la arrogancia?

Paradójicamente, al menos en mi opinión, la expectativa de que otras especies sensibles *deben* estar ahí fuera huele a arrogancia. O mejor dicho, logra la difícil hazaña de ser a la vez auto-importante y auto-eficaz. En el centro de esta expectativa está la creencia de que las adaptaciones *humanas*, atributos como la creatividad y la inteligencia general, que consideramos importantes, son cualidades a las que aspiran otros organismos de la Tierra y que las criaturas alienígenas pueden poseer en una abundancia aún mayor.

Permítanos unos cuantos millones de años más, según nos indica la lógica, y podríamos evolucionar hacia los seres cognitiva, tecnológica y espiritualmente superiores que ya existen ahí fuera. Pero lo contrario de esta posición es seguramente falso. Dele a los chimpancés otros pocos millones de años, para que el razonamiento siga, y ellos también serán tan inteligentes y creativos como nosotros. ¿Pero por qué deberían estarlo? Los chimpancés son buenos para ser chimpancés; los delfines son buenos para ser delfines; los elefantes son buenos para ser elefantes.... En lugar de ser condescendientes con estas especies por no exhibir características humanas, deberíamos respetarlas en sus propios términos para ganarse la vida en un mundo duro al que no le importa si viven o mueren.

Por otro lado, es innegable que la humanidad es profundamente diferente de todas las demás especies de la Tierra. Sólo nosotros tenemos lenguaje, un alto nivel de autoconciencia y un sentido moral. *Somos* especiales. Pero seguramente nuestra singularidad no podría haber surgido por mera casualidad, por el ciego y aleatorio tanteo de la evolución, ¿verdad? Bueno, ¿por qué no?

Como Stephen Jay Gould señaló en una deliciosa analogía, podemos dar cuenta de cualquier crecimiento en la complejidad de los organismos vivos a través del efecto de caminar de un borracho.[237] Imagínese a un borracho apoyado contra una pared. Unos metros a su derecha hay una alcantarilla. Si el borracho da pasos aleatorios de igual tamaño a su izquierda o a su derecha, inevitablemente termina en la alcantarilla. Ninguna fuerza lo impulsa a su derecha; se mueve al azar, y en cualquier momento es tan probable que se mueva a su izquierda como a su derecha. Pero la pared finalmente detiene su movimiento hacia la izquierda; con el tiempo, sólo hay una dirección en la que moverse. Eventualmente, completamente por casualidad, el borracho tropieza en la alcantarilla. El mismo efecto puede explicar cualquier avance que podamos observar en la complejidad de los organismos. En un extremo tenemos una pared de mínima complejidad que los organismos pueden poseer y aún estar vivos. Este muro es donde la vida comenzó, y donde la mayor parte de la vida en la Tierra permanece. Con el tiempo, la evolución juega con organismos más avanzados; cuando la vida misma era joven, esa era la única posibilidad disponible — la evolución no podía probar diseños más simples, porque su camino estaba bloqueado por la pared de mínima complejidad. Algunos de los nuevos diseños funcionaron, en el sentido de que los organismos se adaptaron lo suficientemente bien en sus ambientes inmediatos para sobrevivir lo suficiente como para reproducirse. Y así la evolución se tambaleó, como un borracho ciego, tímidamente produciendo organismos de mayor complejidad. Después de casi 4.000 millones de años de juegos aleatorios, terminamos con el mundo vivo que vemos hoy en día. Pero no había nada inevitable en el proceso; el propósito de la evolución no era producirnos. Reproduzca la cinta de la historia de nuevo, y no hay razón para suponer que el Homo sapiens — o cualquier especie sensible equivalente —

desempeñaría ningún papel.

Muchos científicos eminentes sostienen que la Mente está de alguna manera predestinada en este Universo. Que lejos de ser el resultado del azar, la Mente es un resultado inevitable de las leyes profundas de la autocomplejidad. Ellos argumentan que, durante eones, los organismos inevitablemente se autocompletarán y formarán una "escalera de progreso": procariota a eucariota a plantas a animales a especies inteligentes como nosotros. Es una idea reconfortante, pero no conozco ninguna prueba definitiva a su favor, y creo que el silencio del Universo se opone a ello.

El famoso biólogo francés Jacques Monod escribió que "la evolución es una casualidad". Aún más evocativamente, escribió: "El hombre sabe por fin que está solo en la insensible inmensidad del Universo, de la que sólo ha salido por casualidad".[238] Es un pensamiento melancólico. Sólo puedo pensar en una cosa más triste: si los únicos animales con autoconciencia, las únicas especies que pueden iluminar el Universo con actos de amor, humor y compasión, se extinguieran a través de actos de estupidez. Si sobrevivimos, tenemos una galaxia que explorar y hacer nuestra. Si nos destruimos a nosotros mismos, si arruinamos la Tierra antes de que estemos listos para dejar nuestro planeta natal... bien, podría pasar mucho, mucho tiempo antes de que una criatura de otra especie mire el cielo nocturno de su planeta y se pregunte: "¿Dónde *están* todos?"

Notas y sugerencias

←1

El autor estadounidense Isaac Asimov (1920-1992) fue uno de los autores más prolíficos del siglo XX. Escribió sobre un gran número de temas - desde la Biblia hasta Shakespeare - pero fueron sus libros de ciencia, tanto de ficción como de no ficción, los que tuvieron mayor impacto en mí.
La película *Planeta Prohibido*, aunque es antigua y contiene algunos diálogos que se retuercen, en mi opinión sigue siendo la mejor película en SF de todos los tiempos.

←2

El artículo "pro-Fermi", del geólogo norteamericano y escritor del SF Stephen Lee Gillett (1953-), apareció en la edición de agosto de 1984 de la IASFM. La refutación, por el científico y autor estadounidense Robert A. Freitas Jr. apareció en la edición de septiembre de 1984. Unos años más tarde, Gillett amplió su artículo original y señaló que la "paradoja del lemming" no es una paradoja. Si la Tierra estuviera vacía a excepción de los lemmings, entonces los lemmings estarían en todas partes; pero la Tierra está llena de otros seres vivos, que superan a los lemmings y limitan su propagación. La conclusión correcta que se puede sacar de la no observación de los lemmings es que la Tierra tiene una abundancia de especies vivas que compiten por los recursos (lo cual sabíamos de todos modos, porque vemos vida a nuestro alrededor). Sin embargo, cuando miramos al espacio, no vemos *nada* que indique la presencia de vida.

←3

El lector que no está familiarizado con la notación exponencial sólo necesita saber que es un método conveniente para manejar números muy grandes y muy pequeños. En este libro siempre uso 10 como base y así, en esencia, el exponente cuenta el número de ceros que siguen al 1. Multiplicar números juntos usando esta notación es simple: sólo suma los exponentes. Por ejemplo, $100 = 10 \times 10 = 10^2$ y $1.000 = 10 \times 10 \times 10 = 10^3$. La división es igual de simple: simplemente resta un exponente de otro. Así $1.000 \div 10 = 10^{3-1} = 10^2 = 100$. Para números inferiores a la unidad, el exponente negativo cuenta el número de ceros que siguen al punto decimal. Así $1/100 = 0{,}01 = 10^{-2}$ y $1.000 = 0{,}001 = 10^{-3}$. Usando la notación exponencial podemos escribir, por ejemplo, 1 millón como 10^6 y 1 mil millonésima como 10^{-9}. Esto es útil en la ciencia, donde rutinariamente tratamos con números extremadamente grandes y extremadamente pequeños. Usando la notación exponencial podemos discutir el número de estrellas en el Universo (hay alrededor de 10^{22} estrellas) o la masa de un electrón (su masa es alrededor de 10^{-36} kg) sin recurrir a frases difíciles de manejar como "mil millones de billones" o "trillones de trillones de trillones".

←4

Para los detalles de la vida de Fermi consulté dos fuentes: una biografía escrita por su esposa [1]; y un relato legible de la vida de Fermi en la física, escrito por Emilio Segré, amigo, estudiante y colaborador de Fermi [2]. Segré (1905-1989) ganó el Premio Nobel de Física en 1959.

←5

Luigi Puccianti (1875-1952), maestro de Fermi, fue director del laboratorio de física de la Escuela Normal Superior de Pisa. Puccianti pidió al joven Fermi que le enseñara relatividad. "Eres un pensador lúcido," dijo Puccianti, "y siempre puedo entender lo que explicas."

←6

El físico estadounidense Arthur Holly Compton (1892-1962), ganador del Premio Nobel por su trabajo en física subatómica, estuvo a cargo del proyecto que pretendía lograr la primera reacción nuclear autosostenible. Cuando estaba claro que Fermi había alcanzado la meta, Compton llamó por teléfono a James Bryant Conant (1893-1978), presidente de la Universidad de Harvard. (Conant era químico pero ahora es mejor recordado por su trabajo como educador. La llamada telefónica fue enigmática: "Jim, te interesará saber que el navegante italiano acaba de aterrizar en el nuevo mundo."

←7

Véase [3] para un libro entretenido y legible que trata de una variedad de paradojas. Además de las pocas que cubro aquí, puedes leer sobre la paradoja del barbero de Russell, la paradoja psíquica de Newcomb y muchas otras (pero no la paradoja de Fermi).

←8

Los estudiantes principiantes de álgebra a menudo construyen "pruebas" de afirmaciones obviamente falsas como 1 + 1 = 1. Tales "pruebas" suelen contener un paso en el que una ecuación se divide por cero; esta es la fuente de la falacia, ya que dividir por cero es inadmisible en aritmética. Si se divide por cero se puede "probar" cualquier cosa.

←9

El biomatemático ruso Anatol Rapoport (1911-) es conocido por su trabajo en una variedad de campos, incluyendo el análisis de una famosa paradoja matemática: el Dilema del Prisionero. Para una breve y legible introducción a esta paradoja, ver [4].

←10

La paradoja mentirosa es sólo una de las atribuidas a Eubulides (*c*. siglo IV a.C.). La clase de paradoja de los sorites basada en argumentos "poco a poco" también se atribuye a menudo a Eubulides. No se sabe si él inventó todas estas paradojas ni, si lo hizo, cuáles podrían haber sido sus motivos para hacerlo. La famosa versión pauliana de la paradoja mentirosa aparece en su carta a Tito, el primer obispo de Creta (Tito 1:12-13).

←11

La palabra *sorites* proviene de la palabra griega *soros*, que significa "montón", ya que fue usada por primera vez en el tipo de razonamiento descrito en el texto. (En otras palabras, un grano de arena no hace un montón; si un grano de arena no hace un montón, entonces tampoco lo hacen dos granos; y así sucesivamente hasta el infinito. Véase [5] para un relato exhaustivo de la paradoja de los sorites.

←12

La paradoja del cuervo fue inventada por el filósofo alemán Carl Gustav Hempel (1905-1997), uno de los líderes del movimiento positivista lógico.

←13

La paradoja de la horca inesperada fue notada por primera vez por el matemático sueco Lennart Ekbom cuando escuchó el siguiente anuncio de la emisora de radio sueca en tiempos de guerra: "Un ejercicio de defensa civil se llevará a cabo esta semana. Para asegurarse de que las unidades de defensa civil estén bien preparadas, nadie sabrá de antemano en qué día tendrá lugar este ejercicio". Para más detalles sobre esta paradoja, ver [6] de Martin Gardner. Aunque Gardner (1914-) es más conocido por sus columnas de matemáticas en *Scientific American*, se formó como filósofo y ha publicado artículos académicos sobre la paradoja.

←14

Zenón de Elea (450 a.C.) fue un seguidor de Parménides, un filósofo griego que creía que el

Universo consiste en una sola sustancia indiferenciada. Nuestros sentidos, por supuesto, nos dicen que el Universo es todo menos una "unidad"; percibimos muchas sustancias diferentes. Zenón, por lo tanto, se propuso desacreditar la utilidad de los sentidos humanos como herramienta para descubrir la naturaleza de la realidad. Lo hizo presentando varias paradojas, en un libro (tristemente perdido hace mucho tiempo) sobre el tiempo, el espacio y el movimiento. Nuestros sentidos nos llevan a creer en la existencia del movimiento. Pero como Zenón "demostró" que el movimiento es lógicamente imposible, nuestros sentidos deben ser ilusorios - y por lo tanto no deberíamos tener ningún problema en aceptar las extrañas creencias de Parménides. Al menos tan importante como las paradojas mismas era el tipo de argumento que Zenón empleaba en ellas; el mismo Aristóteles llamó a Zenón el inventor del razonamiento dialéctico.

←15

La resolución de la paradoja de Zenón llegó más de 2000 años después de su muerte, cuando el matemático escocés James Gregory (1638-1675) desarrolló técnicas para manejar series convergentes. Gregory mostró cómo una serie infinita de números puede tener una suma finita. En el ejemplo dado en el texto, la serie infinita 10 + 1 + 0,1 + ... tiene una suma de 11 1/9. En otras palabras, Aquiles adelanta a la tortuga después de 11 1/9 m.

←16

Aunque la paradoja gemela tiene que ver con la teoría especial de la relatividad de Einstein, el propio Einstein, por supuesto, entendió su propia teoría lo suficientemente bien como para no presentar este fenómeno como una paradoja. Sin embargo, aunque Einstein también fue uno de los fundadores de la teoría cuántica, estaba menos seguro de su terreno en este campo. Él y sus colaboradores —Boris Podolsky (1896-1966) y Nathan Rosen (1909-1995)— construyeron un argumento maravillosamente sutil (ahora llamado la paradoja EPR) con la intención de probar que la física cuántica está incompleta. Una vez más, un análisis completo muestra que no hay paradoja - pero a expensas de introducir un fenómeno "espeluznante" (la propia palabra de Einstein) llamado *enredo.* El resultado de la EPR nos dice que todo lo que hemos tocado está ligado invisiblemente a nosotros por las extrañas reglas de la teoría cuántica. El mejor tratamiento de la paradoja de la RPE se encuentra en [7]; ver también [8]. La paradoja fue descrita originalmente en [9].

←17

La paradoja del cielo oscuro lleva el nombre del astrónomo alemán Heinrich Wilhelm Matthaus Olbers (1758-1840), pero otros astrónomos, entre los que destacan Johann Kepler (1571-1630) y Edmond Halley (1656-1742), habían considerado que el problema antes de que Olbers publicara su análisis en 1826. Ver [10] para una discusión minuciosa y elegantemente escrita de la paradoja de Olbers, incluyendo la historia temprana de la pregunta de por qué el cielo está oscuro en la noche.

←18

La primera parte de esta sección se basa en gran medida en [11]. El autor de ese documento se puso en contacto con Emil John Konopinski (1911-1990), Edward Teller (1908-) y Herbert Frank York (1921-), los compañeros de almuerzo de Fermi el día que hizo su famosa pregunta, y les pidió que registraran sus recuerdos del incidente. Durante los primeros años de la década de 1950, los estadounidenses Konopinski y York participaron en trabajos teóricos sobre el desarrollo de armas nucleares, al igual que el (nacido) húngaro Teller (que ha sido descrito como "el padre de la bomba H"). Los tres habrían disfrutado de la aportación de Fermi en las discusiones sobre física nuclear.

←19

El astrónomo americano Frank Donald Drake (1930-) fue la primera persona en la historia en usar un radiotelescopio para buscar CETs. Un relato fascinante de lo que le llevó a una vida en la astronomía, y de las perspectivas de encontrar IET, se puede encontrar en [12].

←20

Konstantin Eduardovich Tsiolkovsky (1857-1935) nació en una familia pobre en la ciudad de Izhevsk en el este de Rusia. A partir de los nueve años sufrió una sordera casi total tras una infección por estreptococos. Sin embargo, se educó y estudió química y física. Ya en 1898 explicó la necesidad de cohetes de combustible líquido para los vuelos espaciales, y en su novela de 1920 *Beyond the Earth* (*Más allá de la Tierra*) describió cómo la gente viviría en colonias en órbita. Promovió sus ideas sobre la vida extraterrestre en dos ensayos titulados "Hay también planetas alrededor de otros soles" (fechado en 1934) y "Los planetas están ocupados por seres vivos" (fechado en 1933).

←21

Para una descripción de la filosofía de Tsiolkovsky y su anticipación de la paradoja de Fermi, ver [13].

←22

Ver [14].

←23

El clásico artículo de Hart generó interés en la paradoja [15].

←24

Lord Douglas de Barloch sugirió [16] que el número de pasos evolutivos que conducían de la vida primitiva a la inteligencia era tan grande que la probabilidad de que ocurriera en otro lugar era infinitesimal.

←25

El físico matemático estadounidense Frank Jennings Tipler III (1947-) ha escrito varios artículos populares sobre el uso de sondas para colonizar la galaxia. Véase, por ejemplo [17].

←26

Glen David Brin (1950-) se formó como astrónomo, pero es mucho más conocido como un galardonado escritor de SF. Su artículo sobre el "gran silencio"[18] sigue siendo uno de los tratamientos más claros del tema. Ver también su popular artículo en [19], que trata brevemente 24 posibles soluciones a la paradoja de Fermi.

←27

Ver [20]. La segunda edición actualizada de este libro muy legible es más fácil de obtener que la primera edición.

←28

Ver [21] para un relato alegre que sugiere que el número de estrellas en el Universo significa que *debe* haber vida en otro lugar: dar algo suficiente de una oportunidad para que suceda y eventualmente sucederá. Sin embargo, muchos lectores pueden encontrar poco convincentes los argumentos que conducen a esta conclusión.

←29

Ver [22].

←30

Ver [23].

←31

La mención de los economistas me recuerda la prueba paradójica de Fermi de la

inexistencia de los viajeros en el tiempo [24]: ¡si existieran los viajeros en el tiempo, los tipos de interés no serían positivos! De hecho, si la gente pudiera viajar en el tiempo, entonces las tasas de interés tendrían que ser del 0%, de lo contrario los ahorradores podrían utilizar los bancos como cajeros automáticos sin fondo. Los ahorradores podrían simplemente viajar hacia atrás en el tiempo unos pocos miles de años, depositar unos pocos dólares, y luego volver al presente; el interés compuesto en incluso una pequeña suma garantizaría riquezas.

←32

Un buen ejemplo de la necesidad de experimentar es el argumento de Tipler de que, en un futuro distante, todos seremos resucitados en software por una inteligencia divina [25]. Su argumento se basa en que el Universo posee ciertas propiedades cosmológicas; las últimas observaciones parecen excluir estas propiedades y, por lo tanto, la teoría de Tipler. No sabríamos esto, sin embargo, a menos que los astrónomos hubieran mirado.

←33

En [26], el autor describe divertidamente la "teoría" de Los Álamos que los húngaros descienden de los marcianos. Los húngaros de Los Álamos formaron un grupo extraordinario de talentos. Edward Teller ya ha sido mencionado. Leo Szilard (1898-1964) contribuyó a la biología molecular, así como a la física nuclear, y también inventó un nuevo tipo de refrigerador doméstico; ¡su coinventor fue Einstein! Eugene Paul Wigner (1902-1995) fue uno de los principales expertos en teoría cuántica. John von Neumann (1903-1957) hizo inmensas contribuciones en varios campos. Theodore von Karman (1881-1963) fue uno de los principales ingenieros aeronáuticos del mundo. Los cinco nacieron en Budapest. Otro físico nacido en Budapest en la misma época, aunque no trabajaba en Los Álamos, fue Dennis Gabor (1900-1979). Gabor ganó el Premio Nobel por su invención de la holografía.
Tal agrupación de talentos es rara, pero probablemente no única. De vez en cuando se han producido otros brotes de brillo. Por ejemplo, los teóricos de partículas de Sheldon Lee Glashow (1932-) y Steven Weinberg (1933-), ganadores del Premio Nobel en 1979, que trabajaban independientemente en la unificación electrodébil, estaban en la misma clase en la Escuela Secundaria de Ciencias del Bronx. También en la clase estaba Gerald Feinberg (1933-), quien desarrolló la idea del taquión. ¡Además de Glashow y Weinberg, la Escuela Secundaria del Bronx ha producido otros tres físicos ganadores del Premio Nobel!

←34

Ezequiel 1:4-28 contiene una descripción de una rueda en el cielo que algunos han elegido interpretar como un platillo volador. La interpretación de los escritos apocalípticos es notoriamente difícil, pero probablemente es justo decir que el profeta Ezequiel no estaba describiendo un evento físico. Dependiendo del punto de vista de uno sobre estas cosas, también podría haber estado describiendo un mensaje de Dios, o podría haber comido algunos hongos divertidos.

←35

Kenneth Arnold (1915-1984) escribió un relato de su avistamiento en el libro de 1952 *The Coming of the Saucers*, publicado en privado.

←36

La muerte relativamente temprana de Edward J. Ruppelt (1922-1959), debido a un ataque al corazón, tristemente pero inevitablemente desencadenó más de unas cuantas teorías de conspiración. Una biografía de Ruppelt, y una discusión del fenómeno OVNI de los años 50, desde el punto de vista de los "ufólogos", se da en [28].

←37

Muchos libros han sido escritos en apoyo de la tesis de que los OVNIs son naves espaciales alienígenas; los enfoques escépticos son mucho menos comunes. Uno de los ensayos más

escépticos sobre el fenómeno OVNI está en [29].

←38

La ley de la parsimonia -el principio de que las entidades no deben multiplicarse más allá de la necesidad- fue probablemente invocada por primera vez por el teólogo dominico francés Guillaume Durand de Saint-Pourçain (*c*.1270-1334). Pero Guillermo de Occam (1284-1347) aplicó el principio con tanta frecuencia y agudeza que llegó a ser conocido como la navaja de Occam.

←39

El suizo Erich Anton von Däniken (1935-) escribió su libro más famoso, *Carrozas de los dioses*, cuando trabajaba como gerente de hotel. Siguió con títulos como *El Regreso de los Dioses* y *El Oro de los Dioses*. Para una excelente y entretenida discusión de por qué estos libros están equivocados, ver [30].

←40

Cinco décadas después, nos parece extraño que alguien pudiera ver un puente en la Luna; pero el astrónomo galés Hugh Percy Wilkins (1896-1960) era un buen observador. Elaboró excelentes mapas del lado cercano de la Luna, y fue honrado en 1961 con el nombre de un cráter lunar de 57 km de diámetro.

←41

Para más detalles sobre este argumento, ver [31].

←42

La idea de que una sonda pueda observar la Tierra durante milenios no es tan descabellada. Incluso con nuestro nivel actual de tecnología, el proyecto KEO planea poner un satélite pasivo en órbita a 1.400 km sobre la superficie de la Tierra y mantenerlo en órbita durante 50.000 años. El satélite, que se lanzará en 2003, es una especie de cápsula del tiempo; llevará mensajes en un CD-ROM de personas que viven hoy en día (cualquiera puede enviar un mensaje al proyecto) y entregárselos a quien sea -o lo que sea- que esté habitando la Tierra. Es una idea del artista francés Jean-Marc Phillipe, que espera enviar un mensaje a nuestros descendientes, al igual que los artistas de las cavernas de Lascaux nos enviaron un mensaje a nosotros.

←43

El matemático ítalo-francés Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) fue uno de los más grandes matemáticos del siglo XVIII. Quizás sus investigaciones astronómicas más importantes se referían a los cálculos de la libración de la Luna y de las órbitas de los planetas.

←44

Una explicación de los ErRPs fue dada en [32]. El trabajo respondía a la hipótesis [33] de que los ErRPs eran evidencia de sondas CET en L4 o L5.

←45

Para un excelente relato de las observaciones de Marte, ver [34].

←46

El astrónomo italiano Giovanni Virginio Schiaparelli (1835-1910), director del observatorio del Palacio de Brera en Milán, hizo varias observaciones importantes de meteoros y cometas antes de dirigir su atención a los planetas en 1877. No fue el primero en grabar canales en Marte; el primer mapa verdadero de Marte, publicado en 1830 por los astrónomos alemanes Wilhelm Beer (1797-1850) y Johann Heinrich von Madler (1794-1874), contiene al menos una característica que parece ser un canal. Sin embargo, Schiaparelli popularizó tanto la idea del *canali* que se convirtió en el tema definitorio de Marte. Tal vez la más famosa de las

historias que aprovechó la posterior fascinación del público por el planeta rojo fue la magnífica novela de 1898 *La guerra de los mundos*, del escritor inglés Herbert George Wells (1866-1946).

←47

Percival Lowell (1855-1916) provenía de una acaudalada familia de Boston y no se dedicó seriamente a la astronomía hasta que tuvo casi 40 años. Logró mucho en la ciencia, a pesar de su tardío comienzo: tenía la determinación de iniciar la búsqueda de un planeta más allá de Neptuno, y el Observatorio Lowell en Arizona lleva su nombre. Sin embargo, siempre estará asociado con sus ideas sobre Marte.

←48

El astrofísico ruso Josif Samuelevich Shklovsky (1916-1985) es más conocido por su explicación de la radiación continua de la Nebulosa del Cangrejo, pero también hizo importantes contribuciones en la astronomía de rayos cósmicos y en la escala de distancias de las nebulosas planetarias. Su popular libro *Intelligent Life in the Universe (Vida Inteligente en el Universo)*, que Carl Sagan tradujo y amplió, es un clásico en este campo.
El astrónomo estadounidense Bevan P. Sharpless (1904-1950) trabajó en el Observatorio Naval de los Estados Unidos; la mala salud dificultó su trabajo a lo largo de su carrera. El quinto cráter más grande de Fobos lleva su nombre.

←49

El astrónomo danés Heinrich Louis d'Arrest (1822-1875), director del Observatorio de Copenhague, montó una búsqueda minuciosa de lunas marcianas en 1862. Sin embargo, fue el astrónomo americano Asaph Hall (1829-1907) quien descubrió las lunas, en 1877. La razón por la que Hall los encontró y d'Arrest no lo hizo es simple: los satélites marcianos están mucho más cerca del planeta de lo que d'Arrest pensaba. Hall miró en el lugar correcto; D'Arrest no. Por lo tanto, la sugerencia del biólogo estadounidense Frank Boyer Salisbury (1926) de que Fobos y Deimos eran satélites artificiales lanzados entre 1862 y 1877 es innecesaria.

←50

El "rostro" de Cydonian fue señalado por primera vez en 1977 por el ingeniero eléctrico americano Vincent DiPietro. El escritor estadounidense Richard C. Hoagland (1945-) ha defendido con más fuerza la idea de que la cara es artificial. Véase, por ejemplo, [35]. Un libro más reciente en este sentido es [36]. Para un artículo refrescantemente sano sobre la cara, ver [37].

←51

El astrónomo greco-americano Michael Demetrius Papagiannis (1932-1998) fue el primer presidente de la comisión de bioastronomía de la Unión Astronómica Internacional. Ver [38].

←52

Ver [39].

←53

Para una discusión en profundidad de la posibilidad de detectar objetos extraños en el Sistema Solar, ver [40].

←54

Quizás el primer documento serio fue el [41]. Un trabajo posterior, en una línea similar fue [42].

←55

Anaxágoras (500-428 a.C.), uno de los más grandes filósofos griegos y maestro de Sócrates, habló de las "semillas de vida" de las que brotan todos los organismos. Sin embargo, no fue hasta el siglo XIX, con obras de Berzelius, Richter, Kelvin y Helmholtz, que la hipótesis de la panspermia tomó una forma moderna. Sobre todo fue el trabajo del químico sueco Svante August Arrhenius (1859-1927), un hombre que ayudó a sentar las bases de la química física moderna, lo que popularizó la noción de que la vida en la Tierra podría haber llegado desde el espacio [43].

←56

Los astrónomos ingleses Fred Hoyle (1915-2001) y Nalin Chandra Wickramasinghe (1939-) han hecho contribuciones excepcionales a la ciencia, pero también han propuesto varias hipótesis que van en contra de la sabiduría recibida. El físico austríaco-inglés-americano Thomas Gold (1920-) es otro científico al que le gusta proponer ideas poco ortodoxas. En broma propuso el escenario de la "basura" para el origen de la vida terrestre: Los CETs aterrizaron aquí antes de que surgiera la vida, tiraron su basura, y la contaminación de la basura ¡fue la semilla de la vida!

←57

Ver [44]. El biofísico inglés Francis Harry Compton Crick (1916-) ganó fama por su descubrimiento, junto con el bioquímico estadounidense James Dewey Watson (1928-), de la estructura de doble hélice del ADN. Ha seguido contribuyendo a nuestra comprensión del código genético. La bioquímica inglesa Leslie Eleazer Orgel (1927-) ha hecho importantes contribuciones al estudio de los orígenes de la vida. La idea Crick-Orgel de la panspermia dirigida se originó en la primera conferencia sobre la comunicación con la inteligencia extraterrestre, organizada en 1971 por Sagan y Kardashev, y celebrada en el Observatorio Astrofísico de Byurakan en Armenia. Muchas de las luminarias en el campo de SETI asistieron a esta conferencia.

←58

El astrónomo estadounidense John Allen Ball (1935-) ha escrito extensamente sobre la paradoja de Fermi. Para la hipótesis del zoológico, ver [45].

←59

La famosa Galaxia "sólo para humanos" de Asimov fue una reacción contra la insistencia de Campbell de que los humanos siempre deberían vencer a los extraterrestres. Asimov pensó que la civilización humana sería menos avanzada que cualquier civilización extraterrestre que pudiéramos encontrar, y no se atrevió a escribir historias en las que la Tierra triunfara sobre la tecnología alienígena superior. Por otro lado, quería venderle historias a Campbell. Por lo tanto, eliminó la fuente potencial de conflicto, y su trilogía de la Fundación describió una Galaxia que sólo contenía humanos. Si la paradoja de Fermi implica que estamos solos, entonces quizás un imperio como el que Asimov describió a regañadientes se haga realidad.

←60

La hipótesis del embargo [46] fue propuesta por James W. Deardorff (1928-), un físico atmosférico retirado. Aunque Deardorff tiene antecedentes científicos, su hipótesis del embargo no es científica. Para una buena introducción al método científico, que usa la hipótesis de Deardorff como ejemplo para ser criticado, ver [47].

←61

El escritor británico Martyn J. Fogg (1960-) se formó originalmente como dentista. En la actualidad es uno de los principales autores de técnicas de ingeniería "especulativas", como la terraformación. Su hipótesis del interdicto apareció originalmente en [48]. Para una cuenta más popular, ver [49].

←62

Véase [50] para una introducción ligeramente fechada, pero aun así una buena introducción

al tema. Asimov era un optimista y argumentó que medio millón de planetas en nuestra Galaxia son el hogar de civilizaciones tecnológicas.

←63

La noción de "Codex Galactica" aparece en [51]; nótese, sin embargo, que se trata de otra idea que apareció en las páginas de las revistas del SF antes de ganar respetabilidad en las páginas de una revista arbitrada.

←64

El escritor británico Stephen Baxter (1957-) es conocido por su "dura" ciencia ficción. Para detalles de su hipótesis del planetario, ver [52].

←65

Existen muchos ejemplos de esta tropa paranoica en la SF. La primera historia de la que tengo conocimiento es "The Earth-Owners" de Edmond Hamilton (1904-1977), que describe una Tierra invadida por extraterrestres disfrazados; los extraterrestres, por supuesto, están ocupados manipulándonos. La historia de Hamilton apareció en la edición de agosto de 1931 de *Weird Tales*. Los historiadores de SF podrían quizás señalar ejemplos incluso anteriores. La historia de Asimov fue "Ideas Die Hard" (*Galaxy*, octubre de 1957). "The News from D Street" de Weiner apareció en la edición de septiembre de 1986 de *IASFM*. Las consideraciones filosóficas que sustentan la hipótesis del planetario se discuten en [53].

←66

Los límites de Bekenstein lleva el nombre del físico estadounidense-israelí nacido en México Jacob David Bekenstein (1947-), quien introdujo el concepto en términos de la termodinámica de los agujeros negros.

←67

Ver [54].

←68

El filósofo austríaco-británico Karl Raimund Popper (1902-1994) propuso la noción de que las hipótesis científicas deben ser falsificables. El impulso de falsificar hipótesis es la esencia de la ciencia. Si una hipótesis no puede ser probada y tal vez encontrada falsa, entonces no es una parte válida del proceso de la ciencia. Aunque sus puntos de vista sobre el progreso científico han sido atacados, siguen siendo influyentes. La idea de Smolin es ciertamente falsificable, ya que hace predicciones específicas comprobables; la novedad es que debe ser probada por cálculo en lugar de por experimentación.

←69

Ver[55].

←70

La inquietante historia corta de Asimov ""The Last Question" (*La Última Pregunta*) cuenta cómo un par de técnicos borrachos una noche le preguntan a una supercomputadora si hay una manera de revertir el aumento de la entropía y así detener la muerte del Universo. La computadora dice que no hay datos suficientes para una respuesta significativa. La misma pregunta se hace a la computadora seis veces durante muchas épocas diferentes. ¡No voy a estropear la historia contándoles la respuesta final de la computadora!

←71

Un buen lugar para aprender sobre los Voyagers 1 y 2 es el sitio web dado en [56]. Ver [57] para otro sitio de la NASA con material útil sobre varios de los conceptos avanzados de propulsión discutidos en esta sección.

←72

Según la teoría de la relatividad restringida, los objetos sin masa, como los fotones, siempre viajan a la velocidad de la luz *c*, mientras que los objetos con masa viajan inevitablemente más lentamente. Por supuesto, es posible acelerar un cuerpo de movimiento lento a una velocidad más rápida actuando sobre él con una fuerza. Desafortunadamente para las perspectivas de los viajes espaciales, la relatividad restringida nos dice que cuanto más rápido se mueven las cosas, más masivas se vuelven. A velocidades cercanas a *c*, la fuerza de aceleración tiende a hacer que el cuerpo sea más masivo en lugar de hacer que se mueva más rápido. La velocidad de la luz es una barrera que no puede ser alcanzada por ningún objeto con masa, incluidas las naves espaciales. Para una buena introducción a estos conceptos, ver [58].

←73

Ver [59] para una discusión de distancias astronómicas.

←74

John Desmond Bernal (1901-1971), físico irlandés, publicó la idea de un barco de generación en un libro visionario [60]. Su libro contiene la siguiente cita, que es relevante para cualquier discusión sobre la paradoja de Fermi. “Una vez aclimatado a la vida espacial, es poco probable que el hombre se detenga hasta que haya vagado y colonizado la mayor parte del Universo sideral, o hasta que éste sea el fin. El hombre no se contentará con ser parásito de las estrellas, sino que las invadirá y las organizará para sus propios fines”. Para “hombre” lea “CET”. Entonces, ¿dónde *están*?

←75

La novela corta *Universo*, del escritor estadounidense Robert Anson Heinlein (1907-1988), apareció en la edición de mayo de 1941 de *Astounding Science Fiction*. (Se puede encontrar más fácilmente en [61].) La historia es uno de varios clásicos de SF escritos por este autor.

←76

La dilatación temporal es otra de las consecuencias inusuales de la relatividad restringida. Al igual que los objetos en movimiento aumentan en masa, los relojes en movimiento van lentos. Cuanto más rápido se mueve un reloj en relación a un observador aquí en la Tierra, digamos, más lento parece que ese reloj hace tictac en comparación con un reloj llevado por el observador en la Tierra.

←77

Esta posibilidad fue dramatizada por el escritor americano Poul William Anderson (1926-2001) en su novela *Tau Zero*. La novela cuenta la historia de un ramjet que acelera a velocidades tan cercanas a *c* que la circunnavegación del Universo se hace posible. Ver [62].

←78

Para una discusión interesante de los problemas inherentes a la navegación hacia una estrella en particular, ver [63].

←79

Además de concebir la idea de un cohete antimateria, el científico austriaco Eugen Sänger (1905-1964) fue pionero en varias ideas prácticas sobre cohetería. Para una magnífica introducción a muchas propuestas diferentes de viajes interestelares, ver [64]. Una fuente más reciente es [65].

←80

La idea de Bussard para el estatorreactor surgió hace más de 40 años [66]. Desde entonces, varios autores han hecho propuestas y sugerencias para mejorar el diseño inicial

del estatorreactor.

←81

El físico estadounidense Robert Lull Forward (1932-), al igual que muchos de los científicos mencionados en este libro, es también un exitoso escritor de SF.

←82

Ver [67] para una discusión sobre las velas láser en una misión de colonización de un solo sentido; para viajes de ida y vuelta, ver [68].

←83

Stanislaw Marcin Ulam (1909-1984), un matemático nacido en Polonia, contribuyó en varios campos. Su autobiografía [69] es fascinante. (Ulam aparece en la figura 28.) El físico inglés Freeman John Dyson (1923-) es uno de los físicos más imaginativos de su generación. Para los artículos sobre propulsión gravitacional, ver [70].

←84

Para una mirada a las posibilidades de la masa negativa, ver [71].

←85

El astrónomo americano Carl Edward Sagan (1934-1996) basó la ciencia en su novela *Contact* en el trabajo del teórico americano Kip Stephen Thorne (1940-) quien ha sido prominente en la investigación de las propiedades de los agujeros de gusano. En 1997, la novela de Sagan se convirtió en una película del mismo nombre, protagonizada por la excelente Jodie Foster.

←86

Miguel Alcubierre Moya (1964-), físico teórico mexicano, trabaja actualmente en el Instituto Max Planck de Física Gravitacional en Potsdam, Alemania. Su artículo que describe el motor *warp* está en [72].

←87

Para más detalles sobre la posibilidad de utilizar agujeros de gusano para el transporte, véase [73]. Para más detalles sobre la velocidad warp de Van Den Broeck, ver [74]. Estos asuntos han sido cubiertos en detalle, y a un nivel no matemático, en las columnas "Alternate View" de John Cramer en *Analog*; ver columnas pasadas en http://www.npl.washington.edu/AV/.

←88

En 1948, el físico holandés Hendrik Brugt Gerhard Casimir (1909-2000) predijo que las fluctuaciones cuánticas del campo EM causarían una pequeña fuerza atractiva para actuar entre dos placas conductoras sin carga paralelas cercanas. La mejor medición directa de este efecto [75] utilizó superficies de cuarzo recubiertas de oro como las placas, con un péndulo de torsión fijado a una de las placas de tal manera que si una placa se movía hacia la otra, el péndulo se torcía. Un láser midió la torsión del péndulo con una precisión de 0,01 micras. El experimento confirmó las predicciones de Casimir. Para los artículos que proponen la idea de que la humanidad podría algún día explotar la energía de punto cero, véase, por ejemplo, [76].

←89

Una de las primeras respuestas al documento de Hart fue [77], en la que se argumenta que es válida una explicación temporal de la paradoja.

←90

Ver [78]. En [79], Jones ha escrito una discusión particularmente entretenida sobre varios

procesos de colonización, desde expansiones humanas pasadas hasta el posible asentamiento humano del Sistema Solar y las estrellas cercanas.

←91

Ver [80].

←92

En física, la difusión es un proceso molecular aleatorio, por el cual la energía o la materia fluye de una concentración más alta a una concentración más baja hasta que se alcanza una distribución uniforme. Por ejemplo, si usted calienta un extremo de una varilla, entonces el calor se difunde desde el extremo caliente hasta el extremo frío. La velocidad del proceso de difusión depende del material de la varilla; en una varilla de metal, la difusión es rápida; en una varilla de asbesto, la difusión es lenta. Otro ejemplo de un proceso de difusión ocurre cuando se pone un terrón de azúcar en una taza de té; a menos que se revuelva el té, las moléculas de azúcar se difunden lentamente a través del líquido. Un sólido puede incluso difuminarse en otro sólido: si el oro está recubierto de cobre, el oro se difunde en la superficie del cobre, aunque los átomos de oro tardan miles de años en penetrar más de una pequeña distancia.

←93

Ver [81] por Ian Crawford para un relato bien escrito de los modelos de colonización galáctica y su relación con la paradoja de Fermi. Ver [48] para detalles del modelo particular de colonización galáctica de Fogg.

←94

Geoffrey Alan Landis (1955-), un físico estadounidense que trabaja en la NASA, es otro científico más conocido como escritor de SF. Para más detalles de su enfoque, ver [82].

←95

Una probabilidad p debe, por definición, estar en el rango entre 0 y 1. Una probabilidad de $p = 0$ corresponde a un evento que es imposible; una probabilidad de $p = 1$ corresponde a un evento que es seguro que ocurra. Si un evento tiene sólo dos resultados - ya sea que el evento ocurra o no - entonces la probabilidad de los resultados debe sumar 1. Así que si la probabilidad de que el evento ocurra es p, la probabilidad de que no ocurra es de $1 - p$.

←96

La teoría de la percolación fue desarrollada en 1957 por el matemático británico John Michael Hammersley (1920-) y sus colegas. Véase [83] para la mejor introducción a las ideas de la teoría de la percolación; sin embargo, aunque este excelente libro es una lectura entretenida, los lectores deben ser conscientes de que inevitablemente contiene un elemento de matemáticas.

←97

En general, el valor de p_c no puede ser derivado analíticamente. En su lugar, debemos utilizar simulaciones por ordenador para estimar la p_c de un sistema determinado. Una celosía cuadrada infinita, por ejemplo, tiene un valor de p_c de 0,59275 aproximadamente. Un ejemplo sencillo debería dejar claro la importancia de una agrupación que abarque todo el territorio. Imaginemos un gran trozo de material aislante eléctrico, en el que incrustamos una cierta fracción, por volumen, de esferas idénticas conductoras de electricidad. Por debajo del valor crítico p_c, no existe ningún clúster de expansión y el material sigue siendo un aislante. Por encima del valor crítico p_c, existe un clúster que se extiende y el material puede conducir electricidad. Las mismas consideraciones nos dicen la densidad de personas a las que se propagará una enfermedad, o la densidad de árboles a los que un incendio consumirá todo un bosque.

←98

¡Es conveniente proporcionar una dirección de sitio web para una referencia sobre la historia de la informática! El Archivo Nacional para la Historia de la Informática, un completo sitio británico alojado en la Universidad de Manchester (el archivo real y físico también está allí) está en:
http://www.library.manchester.ac.uk/search-resources/special-collections/guide-to-special-collections/atoz/national-archive-for-the-history-of-computing/

←99

El ingeniero eléctrico australiano Ronald Newbold Bracewell (1921-) ha sido durante mucho tiempo una figura destacada en SETI. Ver [84].

←100

Esta resolución a la paradoja de Fermi fue discutida en [85], un libro que lamentablemente ya está agotado.

←101

El concepto de la esfera de Dyson apareció por primera vez en [86]. (Una esfera Dyson es una colección suelta de cuerpos moviéndose en órbitas independientes alrededor de una estrella; una esfera rígida sería inestable. La idea inspiró dos grandes novelas de SF: *Ringworld* (*Mundo Anillo*) de Larry Niven y *Orbitsville* de Bob Shaw.

←102

Los astronautas estadounidenses Neil Alden Armstrong (1930-) y Edwin Eugene Aldrin Jr. (1930-) aterrizó en el borde de Mare Tranquillitatis el 20 de julio de 1969; Armstrong caminó sobre la Luna a las 10:56 P.M. (Hora del Este). El *último* hombre en caminar sobre la Luna fue Eugene Andrew Cernan (1934-), y desafortunadamente parece estar preparado para mantener este honor por mucho tiempo. Cuenta sus experiencias con el programa Apolo en [87].

←103

El empresario estadounidense Denis Tito pagó 20 millones de dólares al programa espacial ruso por el privilegio de convertirse en el primer turista espacial. Es un misterio para mí por qué la NASA no ha adoptado el turismo espacial. Robert Heinlein imaginó las posibilidades hace mucho tiempo.

←104

"*Inconstant Moon*", una de las mejores historias del autor estadounidense Laurance (Larry) van Cott Niven (1938-), describe los eventos de una sola noche cuando la luna llena brilla más que nunca. Es una joya, y merecidamente ganó el premio Hugo a la mejor historia corta en 1972.

←105

Ver [88].

←106

Ambientada en mil millones de años en el futuro, la novela de Arthur Clarke *The City and the Stars (La ciudad y las estrellas)* [89] transmite una sensación de asombro y un alcance magnífico que pocas novelas pueden igualar. También presenta al menos dos explicaciones de la paradoja de Fermi, incluyendo la noción de que la humanidad podría preferir permanecer en la "Ciudad" - a salvo de enfrentarse a las realidades de un universo duro.

←107

Ver [90]. Una búsqueda más reciente en 203 GHz de 17 estrellas conocidas por producir exceso de radiación infrarroja (y por lo tanto tal vez albergar esferas Dyson) no encontró nada inusual; ver [91].

←108

En la famosa conferencia de Byurakan sobre la comunicación con la inteligencia extraterrestre, el informático estadounidense Marvin Lee Minsky (1927-) señaló que las CETs verdaderamente avanzadas y conscientes de la energía podrían irradiar a una temperatura justo por encima del fondo cósmico.

←109

Whitmire y Wright [92] no fueron los primeros en sugerir que las estrellas mismas podrían ser usadas para enviar señales. Philip Morrison (1915-) sugirió el método del "eclipse" 20 años antes, y Drake había hecho sugerencias similares antes. Pero su documento es tal vez el primero en dar cálculos detallados de cómo modificar los espectros estelares para enviar una señal.

←110

Ver [93], página 245.

←111

La teoría de Einstein de la relatividad general predijo la existencia de ondas gravitacionales - ondulaciones en el espacio-tiempo. Tales ondas fueron demostradas indirectamente por los físicos americanos Joseph Hooten Taylor Jr. (1941-) y Russell Alan Hulse (1950-) a través de observaciones exquisitamente precisas de PSR 1913+16. Este púlsar es parte de un sistema binario, siendo su socio otra estrella de neutrones. A medida que las dos estrellas orbitan la una en la otra, pierden energía precisamente de la manera prevista por la relatividad general: el sistema binario está irradiando energía gravitacional en forma de ondas. Los astrónomos esperan que la última generación de detectores, como el LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory*) pronto observe las ondas gravitacionales directamente. Incluso LIGO, sin embargo, será capaz de detectar ondas de los fenómenos astronómicos más violentos.

←112

El químico estadounidense Raymond Davis Jr. (1914-) ha estado realizando su experimento de neutrinos solares durante más de 30 años. Ver [94].

←113

El físico italiano Giuseppe Cocconi (1914-) trabajó en la Universidad de Cornell con Morrison antes de regresar a Europa para trabajar en el CERN, donde llegó a ser Director. Su trabajo con Morrison [95] es uno de los clásicos de SETI.

←114

El hertz (Hz), una unidad de frecuencia que lleva el nombre del físico alemán Heinrich Rudolf Hertz (1857-1894), corresponde a un ciclo de vibración por segundo. 1 MHz es 1 millón de vibraciones por segundo; 1 GHz es 1.000 millones de vibraciones por segundo.

←115

Para sugerencias de otras frecuencias SETI ver [96], [97] y [98].

←116

Ver [99] para una discusión de la señal *Wow*.

←117

Paul Horowitz (1942-), astrónomo de Harvard, ha estado a la vanguardia de la investigación del SETI durante varios años. Gran parte de la financiación para META provino de Steven Spielberg (1947-), el director de ET.

←118

La idea de SERENDIP surgió de los astrónomos americanos Jill Tarter (1944-) y C. Stuart Bowyer (1934-) en 1978. Se cree que Tarter, que actualmente es director del Proyecto Phoenix y que ocupa una cátedra en el Instituto SETI, ha sido la inspiración de la heroína de Sagan en *Contact*.

←119

Los físicos estadounidenses Arthur Leonard Schawlow (1921-) y Charles Hard Townes (1915-) ganaron el Premio Nobel de Física (Townes en 1964 y Schawlow en 1981). Townes era muy previsor en cuanto al potencial de los láseres, pero pocos le creían. La sugerencia de que el SETI debería considerar las búsquedas ópticas es casi tan antigua como el documento de Cocconi-Morrison: ver [100].

←120

La creciente importancia del SETI óptico se debe en gran medida a los esfuerzos del ingeniero eléctrico británico Stuart A. Kingsley (1948-). Kingsley ha promovido las atracciones de los canales de comunicación óptica durante más de una década, y la comunidad astronómica finalmente se está acercando a su forma de pensar.

←121

Además de buscar pulsos cortos de láser, como hace Kingsley, los astrónomos han buscado otras evidencias de artefactos en el espectro visible. Un experimento [101] buscó las líneas espectrales de los láseres, por ejemplo. Otro buscó señales ópticas causadas por proyectos de astroingeniería. En los próximos años podemos esperar que el SETI óptico se vuelva cada vez más sofisticado.
Una gran cantidad de información sobre todos los aspectos de SETI se puede encontrar en la Web. Para el SETI óptico, pruebe con [102]. El Instituto SETI [103] tiene información sobre el Proyecto Phoenix. Ver [104] para información sobre el Proyecto BETA. Para involucrarse en el Proyecto Argus, cuyo objetivo es coordinar los esfuerzos de los radioastrónomos aficionados para los propósitos de SETI, ver [105].

←122

Ver [106]. El autor sobrestima su caso, pero el artículo es, sin embargo, accesible y sugerente.

←123

El desarrollo de la Liga SETI es un proyecto amateur. A lo largo de la historia, las observaciones de los aficionados han hecho importantes contribuciones a la astronomía. Es extremadamente satisfactorio que los radioastrónomos aficionados estén ocupando ahora un nicho útil en la búsqueda de CETs.

←124

El análisis [107] fue realizado por el experto en telecomunicaciones Nathan L. Cohen y el informático Robert Hohlfeld.

←125

El patrón de frecuencias “universal” se publicó por primera vez en [108]. Ver también [109].

←126

El proyecto SETI@home [110] fue fundado por el astrónomo estadounidense David Gedye (1960). La idea detrás de esto - a saber, la distribución de pequeñas partes de un gran problema computacional a muchos procesadores - se utilizará cada vez más en el futuro. Los físicos ya están trabajando en un sucesor de Internet, conocido como Grid, que será optimizado para el procesamiento distribuido. Las posibilidades son emocionantes.

←127

La potencia de cálculo se puede clasificar en términos de FLOPS (operaciones en coma flotante por segundo), una unidad que mide el número de procesos aritméticos que un ordenador puede realizar en 1 segundo. En el momento de escribir este artículo, el superordenador más potente del mundo es el ASCI White de IBM, que tiene una clasificación de 12 TeraFLOPS: puede realizar 12 billones de operaciones aritméticas por segundo. El proyecto SETI@home está clasificado actualmente en 15 TeraFLOPS, y sin embargo cuesta una fracción del precio de la máquina IBM. En septiembre de 2001, el proyecto completó un récord mundial de 10^{21} operaciones en coma flotante - un ZettaFLOP!

←128

De cerca de 60 billones de señales, los investigadores de META han encontrado sólo 11 buenas señales candidatas. Sin embargo, si estas señales eran realmente intentos de comunicación, ¿por qué no se podían volver a observar? Una sugerencia fue que los plasmas interestelares o microlentes gravitacionales, que pasaban entre las fuentes y la Tierra, causaban que las señales constantes "brillaran" - y temporalmente se volvieran lo suficientemente fuertes para que las pudiéramos detectar. Desafortunadamente, un reciente análisis de los datos ha descartado esta posibilidad. Este nuevo resultado parece indicar que la Galaxia contiene, a lo sumo, sólo otra civilización con un nivel de tecnología comparable al nuestro que está deliberadamente tratando de contactarnos. Ver [111]

←129

Los astrónomos americanos Benjamin Michael Zuckerman (1943-) y Patrick Edward Palmer (1940-) inspeccionaron 600 de las estrellas similares al Sol más cercanas a 1420 MHz, pero no encontraron señales.

←130

Drake escribió esto en el prefacio de *Is Anyone Out There There?* [12].

←131

De más de 100.000 personas que respondieron a una encuesta de SETI@home, el 89% cree que el descubrimiento ocurrirá dentro de los próximos 100 años. Casi la mitad cree que el descubrimiento ocurrirá en los próximos diez años. Véase el sitio web de SETI@home para obtener detalles actualizados de las respuestas a las encuestas; los valores que doy aquí se refieren a noviembre de 2001.

←132

Es fácil producir estimaciones grandes para el número de civilizaciones comunicantes en la Galaxia: simplemente ponga valores "optimistas" para los varios factores en la ecuación de Drake y usted puede producir números para N que sean tan grandes como 10^6.

←133

Si las CETs pudieran detectar nuestras transmisiones de televisión, entonces podrían deducir mucho sobre nuestro planeta incluso sin decodificar los programas. En 1978, el astrónomo estadounidense Woodruff T. Sullivan III (1944-) mostró cómo una CET ¡podía deducir la velocidad de rotación de la Tierra, estimar su tamaño, la duración de nuestro año, la distancia de la Tierra del Sol, y la temperatura de la superficie de la Tierra!

←134

Para más información sobre Hipparcos ver [59].

←135

La idea de que podamos señalar las CETs tiene casi 200 años de antigüedad. En 1820 el matemático alemán Johann Karl Friedrich Gauss (1777-1855), uno de los más grandes de

todos los matemáticos, sugirió plantar bosques de pinos de tal manera que ilustraran el teorema de Pitágoras; esto señalaría nuestra presencia a cualquier ser inteligente en el Sistema Solar. La idea fue ampliada por Joseph Johann von Littrow (1781-1840), director del Observatorio de Viena, quien sugirió cavar grandes zanjas con formas geométricas, rellenarlas con queroseno e incendiarlas. Él creía que la luz de estos fuegos claramente artificiales sería visible en todo el Sistema Solar. En 1869, el físico francés Charles Cros (1842-1888) sugirió que reflejar la luz solar hacia Marte usando espejos convenientemente dispuestos sería la mejor manera de señalar nuestra presencia a los astrónomos marcianos.

←136

Yvan Dutil y Stephane Dumas, que trabajan en el Canadian Defense Research Establishment, codificaron un mensaje en LINCOS y utilizaron el transmisor Evpatoria en Ucrania para enviar su mensaje. El mensaje era una serie de "páginas" que describían algunas matemáticas básicas, física y astronomía. El experimento Dutil-Dumas fue promovido por una organización llamada *Encounter 2001* (Encuentro 2001). Puede encontrar más información sobre el experimento de la "llamada cósmica", y *Encounter 2001*, en el sitio web [112].

←137

Para una discusión de esta sugerencia, así como para preguntas generales del SETI, ver [113].

←138

El autor estadounidense Fred Thomas Saberhagen (1930-) ha escrito muchas historias sobre berserkers, la primera colección que apareció en *Berserker* en 1967. El concepto de un arma del Juicio Final fue brillantemente satirizado por Stanley Kubrick en *Dr. Strangelove*, y la serie de televisión original de *Star Trek* emitió un episodio llamado *The Doomsday Machine*, que dramatizó la noción de una máquina asesina del mundo indestructible (aunque Kirk y compañía lograron destruirla, por supuesto). La máquina de *Star Trek* era un solo objeto grande y lento. Mi imagen mental de los berserkers es algo diferente: imagino enjambres de pequeñas máquinas de rápido movimiento. Una novela titulada *The Unreasoning Mask* (La máscara irracional), del autor estadounidense Philip Jose Farmer (1918-), es otra que trata la noción de asesinos del mundo. Pero quizás la idea de las máquinas asesinas malignas ha sido tratada más a fondo por el astrofísico americano Gregory Benford (1941-), quien es también uno de los mejores escritores modernos de SF.

←139

Drake cuenta la historia de cómo el astrónomo inglés Martin Ryle (1918-1984), un astrónomo real y ganador del Premio Nobel de Física, estaba perturbado al enterarse de la transmisión de Arecibo de 1974 hacia M13. A Ryle le preocupaba que las CETs avanzadas pudieran atacarnos.
Mi descripción ficticia favorita de una especie cuyo rasgo definitorio es la extrema cautela - llevada al punto de la cobardía - es la de "Puppeters" (Marionetistas). Ocurren en las historias de "Espacio Conocido" de Larry Niven, incluyendo *Ringworld*.

←140

Los dos emperadores mencionados aquí fueron Hongwu (1328-1398) y Yongle (1359-1424); los increíbles viajes del almirante Zheng He (*c.* 1371-*c.* 1435) sólo han salido a la luz relativamente recientemente.

←141

Ver [98].

←142

Véase [12, pág. 210].

←143

Ver [114].

←144

Para una maravillosa crítica de lo que los animales pueden estar haciendo cuando decimos que están contando, ver [115]. El libro ofrece una excelente introducción a los procesos cognitivos de los animales. Para una crítica de la visión platónica de las matemáticas, véase [116]. En [117] se presenta un fuerte caso antiplatónico.

←145

Para un argumento poderoso sobre por qué deberíamos ser capaces de conversar con extraterrestres, usando nuestro sistema de matemáticas y tal vez un lenguaje como LINCOS, ver [118].

←146

El escritor argentino Jorge Luis Borges (1899-1986), quizás el mayor escritor de habla hispana del siglo pasado, fue uno de los autores que pudo imaginar las matemáticas extraterrestres, y sus historias son una delicia.

←147

El lenguaje LINCOS fue desarrollado por el matemático alemán Hans Freudenthal (1905-1990). Hay algunos sitios web dedicados a LINCOS, pero si realmente quieres aprender el idioma, creo que sólo hay una fuente: el libro original (pero agotado) [119].

←148

Si se utiliza radiación EM para transmitir información, el formato más eficiente para un mensaje dado es indistinguible de la radiación de cuerpo negro (para un receptor que no está familiarizado con el formato). Esto se mostró por primera vez en [120]. El mismo resultado, usando diferentes argumentos, fue derivado en [121].

←149

El mejor recurso de impresión para el misterioso manuscrito de Voynich es un pequeño libro de imprenta [122], que es difícil de encontrar. Sin embargo, varios sitios web describen el rompecabezas.

←150

El escritor norteamericano Alfred Bester (1913-1987) publicó en 1956 su famosa novela *The Stars My Destination (Las estrellas, mi destino)* [123]. La obra más ambiciosa de Arthur Clarke es quizás *Childhood's End (El fin de la infancia)* [124]. Sin embargo, las especulaciones aparentemente exageradas no se limitan a la ciencia ficción. Los físicos teóricos también se deleitan en idear ideas salvajes; véase, por ejemplo, [125].

←151

Hugh Everett III (1930-1982) desarrolló la interpretación de muchos mundos de la mecánica cuántica para su tesis doctoral en Princeton. En [126] se publicó un resumen de la tesis. Desafortunadamente, sus ideas no fueron tomadas en serio en el momento de la publicación, y se desanimó y abandonó la academia.

←152

Sugerencias como ésta, que se basan en proyectar motivaciones y modos de pensamiento humanos en mentes extraterrestres, me parecen mostrar una falta de imaginación. Si alguna vez nos encontramos con una inteligencia alienígena, creo que será *verdaderamente* alienígena, con motivaciones que nos resultarán difíciles de descifrar.

←153

Drake y Sobel [12, p. 211] informan de cómo Shklovsky se desanimó en la empresa del SETI en los años anteriores a su muerte. Shklovksy estaba convencido de que la guerra nuclear era ineludible, y que el mismo holocausto inevitable ocurriría con otras civilizaciones tecnológicas.

←154

Uno duda en usar la palabra "inteligente" en este contexto, pero el significado es claro.

←155

Ver [127].

←156

Walter Michael Miller Jr. (1923-1996) fue un radiotelegrafista estadounidense que participó en 53 bombardeos sobre Italia y los Balcanes en la Segunda Guerra Mundial. Su premiado *Cántico para Liebowitz* [128] es una novela clásica post-apocalíptica de SF. La escribió en respuesta al ataque aliado a Monte Cassino, una incursión en la que participó y que casi con toda seguridad le afectó psicológicamente. (El mundo post-holocausto de Miller está descrito vívidamente, pero no lea el libro en busca de precisión científica. Además, los detalles del invierno nuclear sólo se han determinado recientemente.

←157

El término "nanotecnología" fue popularizado por el físico estadounidense K. Eric Drexler. En un influyente libro [129] presentó su visión de una próxima revolución en la ingeniería a nanoescala. Drexler introdujo el término "nanotecnología" para referirse a la fabricación molecular (la construcción de objetos con especificaciones atómicas complejas utilizando secuencias de reacciones químicas dirigidas por maquinaria molecular no biológica) junto con sus técnicas, sus productos y su diseño y análisis. Recientemente, la palabra "nanotecnología" ha venido a denotar cualquier tecnología que tenga efectos a nanoescala - litografía submicrónica (o grabado), por ejemplo. Para distinguir su concepto original del trabajo que actualmente se lleva a cabo en los laboratorios, Drexler se refiere ahora a la "nanotecnología molecular".

←158

Ver [130] para una evaluación matemática detallada de los riesgos ambientales de la nanotecnología.

←159

Un sitio web dirigido por el departamento de física de la Universidad de California en Davis [131] contiene enlaces a los artículos originales que desencadenaron la oleada de controversia sobre el funcionamiento de la RHIC, junto con enlaces a artículos que cuantifican el riesgo y muestran que es esencialmente cero.

←160

El agujero negro más pequeño posible es de unos 10^{-35} m de diámetro (la llamada longitud de Planck); las estructuras más pequeñas son aniquiladas por las fluctuaciones cuánticas). La creación de incluso el agujero negro más pequeño requeriría energías de alrededor de 10^{19} G*e*V, que es miles de millones de veces más grande que las energías que nuestros aceleradores de partículas pueden generar. E incluso si *pudiéramos* crear tal agujero negro, se evaporaría en 10^{-42} segundos. Ciertamente hay cosas más urgentes de las que preocuparse.

←161

La existencia de quarks extraños se conoce desde hace décadas. Sus propiedades clave fueron destacadas por George Zweig (1937-) y Murray Gell-Mann (1929-) en 1964, pero

su presencia fue evidente por primera vez en experimentos de rayos cósmicos realizados por Clifford Charles Butler (1922-1999) y George Rochester (1909-2001) ya en 1947. Es una injusticia que no hayan recibido el Premio Nobel por este logro.

←162

Estos cálculos fueron obra del físico estadounidense Robert Loren Jaffe (1946-) y otros. Para una descripción no técnica, véase [132]. Para un análisis más profundo, véase [133].

←163

La idea [134] de que nuestro Universo puede no estar en el vacío "verdadero" ¡no se originó de las manivelas! Martin John Rees (1942-), astrofísico inglés, es el Astrónomo Real. Su colega holandés Piet Hut (1952-) trabaja en el Princeton Institute for Advanced Studies.

←164

La dirección de Fermilab se exasperó tanto con las protestas de Dixon que discutieron el asunto en el número del 19 de junio de 1998 del boletín *FermiNews* [135].
Kurt Vonnegut, en su novela *Cat's Cradle*, da un relato ficticio de los efectos de una transición de fase (aunque una transición de fase que involucra un imaginario "ice-nine" (hielo-nueve) - una forma de H_2O que es más estable que el agua ordinaria a temperatura ambiente - en lugar del vacío).

←165

El 15 de octubre de 1991, el detector de Rayos Cósmicos de Alta Resolución Fly's Eye de Utah detectó un rayo cósmico con una energía de 320 E*e*V. (Esta energía es tan grande que se requería el prefijo "Exo" de la SI; el prefijo representa un factor de 10^{18}.) La partícula detectada por el Fly's Eye contenía una cantidad *asombrosa* de energía: alrededor de 50 J. En otras palabras, esta única partícula subatómica llevaba más energía cinética que una pelota de tenis que viajaba a 180 mph. Su energía era más de 10 millones de veces mayor que la energía máxima alcanzable del mayor acelerador jamás planificado. Cómo esta partícula adquirió tanta energía es algo misterioso. Ningún proceso obvio puede producir una partícula con tanta energía cinética; sin embargo, *lo que sea* que la produjo debe haber estado relativamente cerca, porque si hubiera viajado distancias cosmológicas, sus interacciones con el fondo de microondas la habrían ralentizado. Ver [136].

←166

Richard Gott III (1947-) es profesor de astrofísica en la Universidad de Princeton. Su artículo original sobre el argumento del Día del Juicio Final [137] pretendía mostrar, entre otras cosas, que es poco probable que la humanidad colonice la galaxia. El artículo generó una interesante correspondencia [138]. El filósofo John Leslie desarrolló independientemente el argumento del Juicio Final [139]. Quizás la primera persona en apreciar el poder de este tipo de razonamiento fue el físico inglés Brandon Carter (1942-); los argumentos antrópicos de Carter se describen en el Capítulo 5.

←167

Gordon E. Moore (1929-) cofundó Intel en 1968.

←168

La ley de Moore, en lugar de la avaricia, es la razón principal por la que estoy reacio a actualizar mi computadora. Me imagino que si espero seis meses más obtendré algo mucho mejor por mi dinero; por otro lado, significa que he estado esperando durante cinco años para actualizarme.

←169

El matemático estadounidense Vernor Steffen Vinge (1944-) ha explorado la idea de la singularidad en varias novelas y cuentos de SF. Se puede encontrar un relato no ficticio de la idea en [140].

Una magnífica discusión sobre el desarrollo aparentemente inexorable de la potencia de computación se puede encontrar en [141].

←170

El término "singularidad" fue utilizado en la década de 1950 por von Neumann. Él dijo: "El siempre acelerado progreso de la tecnología... da la apariencia de acercarse a alguna singularidad esencial en la historia de la raza más allá de la cual los asuntos humanos, tal como los conocemos, no podrían continuar".

←171

Vinge no fue el primero en explorar la idea de que el desarrollo intelectual de la humanidad podría cambiar profundamente nuestra sociedad global. El sacerdote jesuita francés Pierre Teilhard de Chardin (1881-1955) pensó que las mentes individuales de alguna manera se fusionarían para formar la noosfera - una esfera en expansión de conocimiento y sabiduría humana; lo espiritual y lo material eventualmente se fusionarían para formar un nuevo estado de conciencia que él llamó el punto Omega. Su argumento, aunque místico e impreciso, llega a una conclusión que parece similar a la Singularidad de Vinge. Hay dos diferencias principales entre Vinge y Teilhard de Chardin. En primer lugar, Vinge ha extrapolado tendencias del mundo real para sugerir mecanismos específicos que podrían llevarnos a la Singularidad. Segundo, la evolución orgánica requiere millones de años para construir la noosfera; nosotros (y nuestros sucesores) construimos la Singularidad en unas pocas décadas.

←172

Ver [142] para dos libros estimulantes que critican la idea de que la inteligencia "artificial" a nivel humano puede existir. Personalmente, no estoy de acuerdo con las conclusiones de estos distinguidos pensadores; pero las dos referencias aquí hacen una lectura extremadamente interesante.

←173

TEX fue desarrollado por el informático estadounidense Donald Ervin Knuth (1938-). ¡Escribió el software (junto con un programa para diseñar tipos de letra) sólo para poder maquetar su multi-volumen *Art of Computer Programming* a su propia satisfacción! Ver [143].

←174

La historia de Asimov "*Nightfall*" es votada rutinariamente como la mejor historia corta del SF de todos los tiempos. Se puede encontrar en muchas colecciones, incluyendo [144].

←175

Hart es un escritor particularmente claro y contundente. Para una descripción de su propuesta de cómo existen un número infinito de planetas portadores de vida, sin embargo estamos solos en el Universo observable, ver [145]. Un tratamiento igualmente claro del tema, por un cosmólogo, aparece en [146].

←176

El libro de Ward y Brownlee [147], que invita a la reflexión, articula la creciente sospecha de varios astrobiólogos de que la Tierra es inusual, quizás única, en albergar formas de vida complejas.

←177

Para un libro imaginativo, poco ortodoxo y desafiante sobre las formas posibles de vida, véase [148]. Los autores discuten las nociones de vida plasmática en las estrellas, vida radiante en las nubes interestelares, vida en silicatos, vida a baja temperatura y muchas otras posibilidades. Una de las primeras y más deliciosas historias de SF sobre bioquímicas extraterrestres fue *A Martian Odyssey (Una Odisea Marciana)* de Stanley G. Weinbaum (en

Wonder Stories, julio de 1934). La historia se puede encontrar en varias antologías, entre ellas [149].

←178

Véase, por ejemplo, [150].

←179

Ver [151].

←180

Ver [152] - un libro notable y estimulante.

←181

Ver [25].

←182

Ver [153].

←183

Las novelas mencionadas en el texto fueron *Integral Trees (Árboles integrales)* de Larry Niven y *Dragon's Egg (Huevo del dragón)* de Robert Forward.

←184

El naturalista francés George-Louis Le Clerc, Conde de Buffon (1707-1788), propuso en 1749 que los planetas se formaron cuando un cometa colisionó con el Sol. El filósofo alemán Immanuel Kant (1724-1804) propuso la teoría nebular de la formación planetaria en 1754.

←185

Los primeros modelos de formación planetaria por colisiones estelares fueron desarrollados por los científicos americanos Thomas Chrowder Chamberlin (1843-1928) y Forest Ray Moulton (1872-1952). Los modelos fueron cambiados y mejorados por los matemáticos británicos James Hopwood Jeans (1887-1946) y Harold Jeffreys (1891-1989). Ver [154] para un fascinante recorrido por el Sistema Solar, incluyendo su formación. El autor llega a la conclusión de que la vida en la Tierra puede ser el resultado de la casualidad; y tal vez esto signifique que es improbable que la vida ocurra en otro lugar.

←186

Para más detalles sobre los más recientes descubrimientos planetarios, visite *The Extrasolar Planets Encyclopædia (La Enciclopedia de los Planetas Extrasolares)* - un sitio web dirigido por Jean Schneider [155].

←187

El 15 de agosto de 2001 se anunciaron las noticias del nuevo planeta que orbita 47 Ursae Majoris. Para más detalles, véase [156]. También puede encontrar más información sobre el planeta en [155].

←188

La edad aceptada de la Tierra, calculada por geoquímicos utilizando técnicas de datación radioisotópica, es de 4,55 ± 0,7 mil millones de años. Este valor fue presentado por primera vez en 1956 por la geoquímica americana Clair Cameron Patterson (1922-1995). Así, dentro de los márgenes de error, podemos estar seguros de que la Tierra se formó al mismo tiempo que las condritas.

←189

Las referencias a lo que ahora sabemos son condrículas fueron hechas en la literatura científica desde 1802, aunque no fueron nombradas hasta 1864 (por el mineralogista alemán Gustav Rose [1798-1873]). El geólogo inglés Henry Clifton Sorby (1826-1908), uno de los grandes científicos aficionados, utilizó un microscopio petrográfico -un dispositivo que él inventó- para llevar a cabo el primer estudio detallado de las condrículas. Sugirió que las chimeneas, que describió como "como gotas de una lluvia ardiente", podrían ser pedazos del Sol que habían sido eyectados en las prominencias solares.

←190

Ver [157].

←191

Uno de los primeros libros en discutir las condiciones que podrían ser necesarias para hacer un planeta habitable para la humanidad fue [158]. Aunque ya está bastante anticuada, sigue siendo una excelente guía de los problemas a los que hay que hacer frente. El libro fue el resultado de un estudio RAND y es bastante técnico. Una versión popular, también recomendada, es [159].

←192

En la mayoría de los modelos, un planeta similar a la Tierra se congela cuando una "manta" de CO_2 impide que la radiación de su estrella penetre en la atmósfera.

←193

Ver [160].

←194

El geólogo estadounidense James Fraser Kasting (1953-) ha hecho varias contribuciones importantes a nuestra comprensión de la estabilidad a largo plazo del clima de la Tierra. Los modelos que él y sus compañeros de trabajo emplean son mucho más detallados que el modelo original de Hart. Ver [161] para más detalles.

←195

Ver [162].

←196

Cuando la Tierra se condensó por primera vez del disco protoplanetario, las temperaturas eran demasiado altas para que hubiera retenido agua. Así que nuestros océanos de agua deben haber sido liberados *después* de que la Tierra se enfriara. Si el agua llegara cuando la Tierra ya estaba en, o cerca de, su masa actual, entonces sería lo suficientemente masiva como para retener la mayor parte de su agua. ¿Pero de dónde salió toda el agua? El escenario estándar es que el agua se condensó en hielo en las regiones exteriores del disco -tal vez en los cometas, donde las temperaturas eran más frías. Un bombardeo de cometas más tarde liberó los océanos. Trabajos recientes ponen en duda este escenario. Sabemos por las mediciones de Júpiter que la nebulosa solar inicial contenía cerca de 30 partes por millón de deuterio, y las mediciones de los cometas Hale-Bopp, Halley y Hyakutake demuestra que los cometas contienen cerca de 450 partes por millón de deuterio. Ninguno de estos valores se acerca al valor del agua de mar, que contiene aproximadamente 150 partes por millón de deuterio. Los meteoritos del Cinturón de Asteroides exterior, sin embargo, tienen la misma abundancia de deuterio que el agua de mar. Por lo tanto, parece probable que la Tierra obtuviera su agua de una colisión con un gran embrión planetario, más que de un bombardeo cometario. Ver [163] para más detalles.

←197

Ver [164].

←198

El astrónomo estadounidense Daniel Kirkwood (1814-1895) sugirió por primera vez en 1866 que los efectos de resonancia deberían causar huecos en el Cinturón de Asteroides. Jack Leach Wisdom (1953-), un físico americano, fue uno de los primeros científicos en aplicar las técnicas modernas de dinámica no lineal a las órbitas de estudio en el Sistema Solar. Sabiamente miró la resonancia 3:1 del Cinturón de Asteroides en detalle. El geólogo estadounidense George West Wetherill (1925-) es bien conocido por sus investigaciones sobre el papel que juega Júpiter en el Sistema Solar.

←199

Los magnetares son estrellas de neutrones con campos magnéticos excepcionalmente fuertes. El campo de SGR1900+14 se estima en 5 x 10^{14} Gauss; compárelo con el campo magnético sostenido más fuerte que los científicos han hecho, que es solamente 4 x 10^{5} Gauss. El campo magnético de una magnetar es tan fuerte que podría chupar las llaves de su bolsillo a una distancia de más de 165.000 km. Por supuesto, si estuvieras parado tan cerca de un magnetar, entonces la radiación y el viento de partículas cargadas que expulsa te mataría instantáneamente.

←200

Los estallidos de rayos gamma fueron detectados por primera vez en 1969 por los satélites VELA (que estaban en órbita para buscar rayos gamma de posibles explosiones nucleares), pero no fue hasta 1997 que los astrónomos obtuvieron la prueba de que los estallidos ocurren a distancias cosmológicas; incluso ahora la naturaleza exacta de los eventos progenitores es un tema de debate.

←201

Ver [165].

←202

El cuento “The Star” (La estrella) de Arthur Clarke aparece en muchas antologías. Véase, por ejemplo, [166].

←203

La noción de que la Tierra experimentó una glaciación global en la era Neoproterozoica no es nueva: el geólogo inglés Brian Harland postuló precisamente esto ya en 1964. Al mismo tiempo, el geólogo ruso Mikhail Budyko mostró cómo se podía producir un efecto de casa de hielo *desbocada*. Sin embargo, sólo recientemente, esta noción ha sido tomada en serio - en gran parte debido al trabajo de grupos liderados por los geólogos americanos Joseph Kirschvink y James Kasting, quienes han investigado la ruta de escape de “Snowball Earth”. Para una introducción temprana, ver [167]. Una introducción claramente escrita a las teorías de la Tierra Bola de Nieve aparece en [168]. Entre los documentos más técnicos se incluyen [169] y [170].

←204

Ver [171]

←205

Ver [172]

←206

La idea de que el impacto de un meteorito mató a los dinosaurios es antigua. El documento clave es [173]. Años antes de que apareciera ese documento, sin embargo, se publicó un artículo notablemente premonitorio en una revista del SF [174]. Describió las consecuencias de un gran meteorito que golpeó la Tierra. Una mirada entretenida a la evidencia de un impacto de meteorito que causó la extinción del Cretáceo-Terciario aparece en [175]; ¡el

libro es tan bueno como su título!

←207

Véase [176]

←208

El terremoto del 17 de agosto de 1999 alrededor de Izmit, Turquía, causó muchos miles de muertos y la destrucción de innumerables hogares. El número de víctimas del terremoto del 26 de enero de 2001, que sacudió la zona de Kachchh en Gujarat (India), superó las 20.000 personas. El terremoto de Izmit se debió a la catastrófica liberación de estrés en la zona de la falla de Anatolia del Norte, donde se encuentran las placas de Anatolia y Eurasia. El terremoto de la India -el más dañino que ha golpeado a esa región en más de 50 años- fue causado por la placa india empujando hacia el norte dentro de la placa euroasiática.

←209

El primero en reunir evidencia para la sugerencia de que los continentes se mueven fue el meteorólogo alemán Alfred Lothar Wegener (1880-1930). Publicó sus ideas sobre la deriva continental en 1915, pero fueron ridiculizadas. Una de las aparentes fallas de su teoría era que ningún mecanismo conocido podía explicar la deriva de continentes. Wegener murió en una ventisca durante una expedición al Ártico, poco antes de que el geólogo británico Arthur Holmes (1890-1965) sugiriera que la convección podría proporcionar un mecanismo adecuado para explicar la deriva continental. Holmes fue un geólogo respetado; fue el primero, por ejemplo, en sugerir una escala de tiempo razonable para los procesos geológicos. Su estimación de 1913 de 4.000 millones de años para la edad de la Tierra era mucho mejor que cualquier estimación anterior. Pero pasaron casi otros 20 años antes de que la idea se estableciera. En 1960, el geólogo estadounidense Harry Hammond Hess (1906-1969) demostró que el lecho marino se extendía desde los respiraderos de las grietas oceánicas. A medida que el magma crecía y se enfriaba, alejaba el lecho marino existente de ambos lados de las grietas. Fue esta fuerza la que movió los continentes.

←210

La primera descripción del termostato de CO_2 a escala geológica de la Tierra apareció en [177]. Este mecanismo no tiene en cuenta el efecto que los organismos biológicos podrían haber tenido en la estabilización de la temperatura de la superficie del planeta. Varios científicos prominentes opinan que la vida misma ha jugado un papel clave en el mantenimiento de la temperatura a un nivel ecuánime.

←211

Dos grupos llegaron independientemente a la idea de la formación lunar por un impactador del tamaño de Marte. Un grupo fue dirigido por los astrónomos americanos William K. Hartmann (1939-) y Donald Ray Davis (1939-), quienes trabajan en el Instituto de Ciencias Planetarias en Arizona. El otro grupo fue liderado por el astrónomo canadiense-americano Alastair Graham Walter Cameron (1925-) de la Universidad de Harvard.

←212

Para un tratamiento entretenido de la importancia de la Luna, que está dirigido a los no científicos, ver [178].

←213

La clasificación de los organismos vivos en los dominios de archaea, bacterias y eukarya es relativamente reciente. La propuesta provino del biofísico estadounidense Carl R. Woese (1928-), quien descubrió microorganismos que vivían en ambientes extremos (extremos de calor, salinidad, acidez - lugares previamente considerados hostiles a la vida). Al principio se pensó que estos organismos eran bacterias que habían logrado adaptarse a condiciones extremas; ciertamente, el núcleo celular de estos organismos no estaba encerrado dentro de una membrana nuclear, lo que los hacía parecer bacterias. Sin embargo, Woese y sus

compañeros de trabajo se embarcaron en un estudio del ARN ribosomal de estos extremófilos. (En las células, el ARN ribosomal es el sitio de síntesis de proteínas - el lugar donde los aminoácidos se unen en proteínas. Por lo tanto, se encuentra en todas las células vivas, y un estudio de la secuencia de nucleótidos del ARNr proporciona un "cronómetro evolutivo" ideal. Encontraron que el ARNr de los extremófilos difiere radicalmente del ARNr de las bacterias. Estas y otras diferencias fundamentales dejaron claro a Woese que la vida consta de tres dominios. El documento de referencia es [179].

←214

El autor argumenta de manera persuasiva que los aún desconocidos principios de auto-organización pueden apuntalar fenómenos tan diversos como los comienzos de la vida para el funcionamiento de las economías de mercado.

←215

La historia de los ácidos nucleicos se remonta a mucho tiempo atrás. El bioquímico alemán Albrecht Kossel (1853-1927) fue el primero en investigar la estructura química de la molécula de ácido nucleico; fue él quien aisló las bases nitrogenadas y las denominó adenina, guanina, citosina y timina. Ganó el Premio Nobel de 1910 por su descubrimiento. Cuarenta años más tarde, el papel que el ADN podría desempeñar en la herencia fue uno de los temas candentes de la biología. En 1953, Francis Crick y James Watson hicieron uno de los avances clave en toda la ciencia cuando propusieron el modelo de doble hélice de la molécula de ADN.

←216

Para un buen y colorido libro de texto sobre genética a nivel de pregrado, véase [181]; los capítulos sobre la expresión génica y la regulación de la actividad génica son particularmente útiles. Otro libro de texto de alta resistencia es [182].

←217

Véase, por ejemplo, [183]. Una buena colección de artículos académicos que tratan de la posible importancia de los cometas para la vida en la Tierra, incluyendo la idea de que los cometas podrían haber transportado aminoácidos y otros materiales necesarios a la Tierra, se puede encontrar en [184].

←218

La historia de la investigación científica sobre la cuestión del origen de la vida es larga y fascinante. Comenzó en 1924 con el biólogo ruso Alexander Ivanovich Oparin (1894-1980), quien sugirió que pequeños terrones de materia orgánica podrían haberse formado naturalmente y convertirse en el precursor de las proteínas modernas. Junto con el biólogo británico John Burdon Sanderson Haldane (1892-1964), produjo la evocadora idea de la sopa primordial, de la que surgió la materia viva. No fue hasta 1953 que el biólogo estadounidense Stanley Lloyd Miller (1930-), estudiante de postgrado que trabajaba en el laboratorio del químico ganador del Premio Nobel Harold Clayton Urey (1893-1981), puso estas ideas a prueba experimentalmente. Los resultados de los experimentos de Miller sugirieron que al menos los componentes básicos de la vida podrían formarse naturalmente en una Tierra primordial. Sin embargo, hay muchos pasos que conducen de estos bloques de construcción a la vida misma, y la ruta permanece envuelta en niebla. Se trata de un área de investigación fascinante y activa.

←219

Para un argumento de por qué el surgimiento de la vida podría ser un acontecimiento raro, ver [185]. Creo que los argumentos del documento son erróneos, pero como de costumbre Hart expone su caso de forma clara y contundente.

←220

Las primeras ribosomas -enzimas hechas de ARN- fueron descubiertas independientemente

en 1983 por el bioquímico estadounidense Thomas Robert Cech (1947-) y el bioquímico canadiense Sidney Altman (1939-).

←221

Para una mirada entretenida a la lógica detrás de las actividades del SETI, ver [186]. Una obra lanzada a un nivel similar es [187].

←222

Dos libros excelentes sobre el problema del origen de la vida, y la probabilidad de que la vida surja en otro lugar, son [188] y [189]. Ambos libros contienen material técnico, pero ambos pueden ser apreciados por el lector general. El libro de De Duve, en particular, es excepcionalmente exhaustivo y llega a la conclusión de que la vida debe ser común en el Universo.

←223

Varios artículos tratan de la posibilidad de vida en los satélites de los planetas gigantes. La sugerencia original fue hecha en [190]. Para artículos más recientes, que contienen muchas referencias adicionales, ver [191] y [192].

←224

Ver [193]

←225

Existe una amplia literatura sobre el uso de herramientas animales, aunque no existe una definición única de lo que constituye el uso de herramientas. ¿Utiliza un perro una pared como herramienta cuando se rasca la espalda? Dependiendo de la definición de cada uno, se ha observado que muchos animales usan herramientas. Con respecto a los chimpancés, por ejemplo, ver [194] y [195]. Con respecto a los monos capuchinos, véase [196]. Con respecto a los elefantes, véase [197]. Tres buenos libros sobre el tema (incluyendo el desarrollo del uso de herramientas humanas) son [198], [199] y [200].

←226

Ver [201] y [202]

←227

En [203] se presenta un artículo introductorio en el que se describe cómo coexistieron varias especies de homínidos. Para cuatro excelentes libros sobre el uso de herramientas humanas tempranas, ver [204], [205], [206] y [207].

←228

Para una discusión sobre arte rupestre ver, por ejemplo, [208].

←229

Para artículos sobre el gen *sin ojos* en moscas de la fruta, ver [209] y [210].

←230

Ver [115] para un magnífico relato de la investigación sobre la cognición animal. Es un libro maravilloso. Para un punto de vista diferente sobre la cuestión de la conciencia e inteligencia animal, ver [211].

←231

Ver [212] para una discusión de la relevancia de las habilidades lingüísticas humanas en la paradoja de Fermi.

←232

El lingüista estadounidense Avram Noam Chomsky (1928-), uno de los intelectuales más respetados del mundo, escribe ampliamente sobre temas políticos y sociales, así como sobre lingüística. Su trabajo lingüístico es muy abstruso, pero para una introducción a la revolución que desencadenó en 1959 - y a los avances hechos por otros en las décadas intermedias - no busque más allá del magníficamente legible libro de Pinker [213].

←233

Mientras se enviaba este libro a la imprenta, se publicaron noticias sobre la primera identificación de un gen responsable de un trastorno específico del lenguaje. El gen, llamado FOXP2, codifica una proteína poco común involucrada en el desarrollo de estructuras neurales en el embrión. La alteración del gen FOXP2 lleva a una anormalidad en las estructuras neurales que son importantes para el habla y el lenguaje. Este descubrimiento refuerza la noción de que nuestra capacidad de hablar tiene un fuerte componente genético. Ver [214].

←234

Hay varios buenos informes sobre el desarrollo histórico de la ciencia. Véase, por ejemplo, [215].

←235

El artículo de Brin [18] fue mencionado más arriba, en la sección titulada “La paradoja de Fermi”.

←236

Eratóstenes de Cirene (c. 276 a.C. - 196 a.C.) fue un hombre de amplios intereses. Otros griegos lo apodaron Beta, la segunda letra del alfabeto griego, porque era el segundo mejor erudito en tantos campos del conocimiento. Para información sobre números primos, consulte cualquier libro sobre números. Mi favorito es [216].

←237

Véase [217]

←238

Ver [218]. Esta traducción del original francés es de A. Wainhouse.

Referencias

[1] Fermi L (1954) *Atoms in the Family* (Chicago: University of Chicago Press)

[2] Segre E (1970) *Enrico Fermi: Physicist* (Chicago: University of Chicago Press)

[3] Poundstone W (1988) *Labyrinths of Reason* (London: Penguin)

[4] Rapoport A (1967) Escape from paradox. *Scientific American 217* (1) 50-6

[5] Williamson T (1994) *Vagueness* (London: Routledge)

[6] Gardner M (1969) *The Unexpected Hanging and Other Mathematical Diversions* (New York: Simon and Schuster)

[7] Mermin N D (1990) *Boojums all the Way Through* (Cambridge: CUP)

[8] Gribbin J (1996) *Schrodinger's Kittens* (London: Phoenix Press)

[9] Einstein A, Podolsky B and Rosen N (1935) Can a quantum-mechanical description of physical reality be considered complete? *Physical Review 41* 777-80

[10] Harrison E (1987) *Darkness at Night* (Cambridge, MA: Harvard University Press)

[11] Jones E M (1985) Where is everybody? An account of Fermi's question. *Preprint LA-10311-M S*. (Los Alamos, N M: Los Alamos National Laboratory). A more easily located version of this reference appeared in the August 1985 issue of *Physics Today* pp 11-3.)

[12] Drake F and Sobel D (1991) *Is Anyone Out There?* (London: Simon and Schuster)

[13] Lytkin V, Finney B and Alepko L (1995) Tsiolkovsky, Russian cosmism and extraterrestrial intelligence. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc. 36* 369-76

[14] Viewing D (1975) Directly interacting extra-terrestrial technological communities. *J. Brit. Interplanetary Soc.*

28 735-44

[15] Hart M H (1975) An explanation for the absence of extraterrestrials on Earth. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc. 16* 128-35

[16] Douglas (1977) The absence of extraterrestrials on Earth. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc. 18* 157-8

[17] Tipler F J (1980) Extraterrestrial intelligent beings do not exist. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc. 21* 267-81

[18] Brin G D (1983) The "great silence": the controversy concerning extraterrestrial intelligent life. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc. 24* 283-309

[19] Brin G D (1985) Just how dangerous *is* the Galaxy? *Analog* 105 (7) 80-95

[20] Zuckerman B and Hart M H (eds) (1995) *Extraterrestrials — Where Are They?* (Cambridge: CUP)

[21] Aczel A (1998) *Probability 1: Why There Must be Intelligent Life in the Universe* (New York: Harcourt Brace)

[22] Smolin L (1997) *The Life of the Cosmos* (London: Weidenfeld and Nicolson)

[23] Gould S J (1985) SETI and the wisdom of Casey Stengel. In *The Flamingo's Smile* (London: Penguin)

[24] Reinganum M R (1986-7) Is time travel impossible? A financial proof. *J. of Portfolio Management* 13 (1) 10-2

[25] Tipler F J (1994) *The Physics of Immortality: Modern Cosmology, God and the Resurrection of the Dead* (New York: Anchor)

[26] McPhee J (1973) *The Curve of Binding Energy* (New York: Farrar, Straus and Giroux)

[27] Lanoutte W *et al* (1994) *Genius in the Shadows* (Chicago: University of Chicago Press)

[28] Hall M D and Connors W A (2000) *Captain Edward J. Ruppelt: Summer of the Saucers* (Albuquerque, NM: Rose Press)

[29] Sheaffer R (1995) An examination of claims that extraterrestrial visitors to Earth are being observed. In Zuckerman B and Hart M H (eds) *Extraterrestrials: Where Are They?* (Cambridge: CUP)

[30] Story R (1976) *The Space Gods Revealed: A Close Look at the Theories of Erich von Däniken* (New York: Barnes and Noble)

[31] Freitas R A Jr and Valdes F (1980) Asearch for natural or artificial objects located at the Earth-Moon libration points *Icarus* 42 442-7. Also see Freitas R A Jr (1983) If they are here, where are they? Observational and search considerations. *Icarus* 55 337-43

[32] Lawton A T and Newton S J (1974) Long delayed echoes: the search for a solution. *Spaceflight* 6 181-7

[33] Lunan D (1974) *Man andthe Stars* (London: Souvenir Press)

[34] Sheehan W (1996) *The Planet Mars: A History of Observation and Discovery* (Tucson, AZ: University of Arizona Press)

[35] Hoagland R C (1987) *TheMonuments ofMars* (Berkeley, CA: North Atlantic Books)

[36] Hancock G, Bauval R and Grigsby J (1998) *The Mars Mystery* (London: Michael Joseph)

[37] Gardner M (1985) The great stone face and other nonmysteries. *Skeptical Inquirer* 9 (4)

[38] Papagiannis M D (1978) Are we all alone,or could they be in the asteroid belt? *Quarterly J. Royal Astronomical Soc.* 19 236-51

[39] Stephenson D G (1978) Extraterrestrial cultures within the Solar System? *Quarterly J. Royal Astronomical Soc.* 19 277-81

[40] Freitas R A Jr (1983) The search for extraterrestrial artifacts (SETA) *J. Brit. Interplanetary Soc.* 36 501-6. See also Freitas R A Jr (1985) There is no Fermi paradox. *Icarus* 62 518-20

[41] Yokoo H and Oshima T (1979) Is bacteriophage phi X174 DNA a message from an extraterrestrial intelligence? *Icarus* 38 148-53

[42] Nakamura H (1986) SV40 DNA: a message from Epsilon Eridani? *Acta Astronautica* 13 573-8

[43] Arrhenius SA(1908) *Worlds in the Making* (New York: Harper and Row)

[44] Crick F H C and Orgel L E (1973) Directed panspermia. *Icarus* 19 341-6. A fuller account is giveninCrickFHC(1981) *Life Itself* (New York: Simon and Schuster)

[45] Ball J A (1973) The zoo hypothesis. *Icarus* 19 347-9

[46] Deardorf J W (1986) Possible extraterrestrial strategy for Earth. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc. T7* 94-101; Deardorf J W (1987) Examination of the embargo hypothesis as an explanation for the Great Silence. *J. Brit. Interplanetary Soc.* 40 373-9

[47] Carey S S (1997) *A Beginner's Guide to Scientific Method* (Stamford, CT: Wadsworth)

[48] Fogg M J (1987) Temporal aspects of the interaction among the first galactic civilizations: the "interdict hypothesis." *Icarus* 69 370-84

[49] Fogg M J (1988) Extraterrestrial intelligence and the interdict hypothesis. *Analog* 108 (10) 62-72

[50] Asimov I (1981) *Extraterrestrial Civilizations* (London: Pan)

[51] Newman W I and Sagan C (1981) Galactic civilizations: population dynamics and interstellar diffusion. *Icarus* 46 293-327

[52] Baxter S (2000) The planetarium hypothesis: a resolution of the Fermi paradox. *J. Brit. Interplanetary Soc.* 54 210-6

[53] Deutsch D (1998) *The Fabric of Reality* (London: Penguin). See also Tipler F J (1994) *The Physics of Immortality* (New York: Anchor)

[54] Smolin L (1997) *The Life of the Cosmos* (London: Weidenfeld and Nicolson)

[55] Harrison E (1995) The natural selection of universes. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc.* 36 193-203

[56] The *Voyager Project Page* is at http://voyager.jpl.nasa.gov

[57] The JPL site is at http://www.jpl.nasa.gov/index.cfm

[58] French A P (1968) *Special Relativity* (San Francisco: Norton)

[59] Webb S (1999) *Measuring the Universe*

(London: Springer UK)

[60] Bernal J D (1969) *The World, The Flesh and the Devil* (Indiana: Indiana University Press). This is reprint of an earlier edition.

[61] Bova B (ed) (1973) *The Science Fiction Hall of Fame vol 2A* (New York: Doubleday)

[62] Anderson P (2000) *Tau Zero* (London: Orion). This is a re-issue of a classic book in the SF Collector's Edition.

[63] Hemry J G (2000) Interstellar navigation or getting where you want to go and back again (in one piece). *Analog* 121 (11) 30-7

[64] Mallove E F and Matloff G L (1989) *The Starflight Handbook* (Wiley: New York)

[65] Crawford I A (1995) Interstellar travel: a review. In Zuckerman B and Hart M H (eds) *Extraterrestrials: Where Are They?* (Cambridge: CUP)

[66] Bussard R W (1960) Galactic matter and interstellar flight. *Astronautica Acta* 6 179-94

[67] Dyson F J (1982) Interstellar propulsion systems. In Zuckerman B and Hart M H (eds) *Extraterrestrials: Where Are They?* (Cambridge: CUP)

[68] Forward R L (1984) Roundtrip interstellar travel using laser-pushed lightsails. *J. of Spacecraft and Rockets* 21 187-95

[69] Ulam S M (1976) *Adventures of a Mathematician* (Berkeley, CA: University of California Press)

[70] Ulam S M (1958) On the possibility of extracting energy from gravitational systems by navigating space vehicles. Report LA-2219-MS. (Los Alamos, NM: Los Alamos National Laboratory). See also Dyson F J (1963) Gravitational machines. In *Interstellar Communication* ed. A G W Cameron (New York: Benjamin)

[71] Forward R L (1990) The negative matter space drive. *Analog* 110 (9) 59-71

[72] Alcubierre M (1994) The warp drive: hyper-fast travel within general relativity. *Classical and Quantum Gravity* 11 L73-7

[73] Krasnikov S V (2000) A traversible wormhole. *Phys. Rev.* D 62 084028

[74] Van Den Broeck C (1999) A "warp drive" with more reasonable total energy requirements. *Classical and Quantum Gravity* 16 3973-9

[75] Lamoreaux S K (1997) Demonstration of the Casimir force in the 0.6 to 6 μm range. *Physical Review Letters* 78 5-8

[76] Haisch B, Rueda A and Puthoff H E (1994) Beyond $E = mc^2$. *The Sciences* 34 (6) 26-31. See also Puthoff H E (1996) SETI, the velocity of light limitation, and the Alcubierre warp drive: an integrating overview. *Physics Essays* 9 156

[77] Cox L J (1976) An explanation for the absence of extraterrestrials on Earth. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc.* 17 201-8

[78] Jones E M (1975) Colonization of the Galaxy. *Icarus* 28 421-2; and Jones E M (1981) Discrete calculations of interstellar migration and settlement. *Icarus* 46 328-36

[79] Jones E M (1995) Estimates of expansion timescales. In Zuckerman B and Hart M H (eds) *Extraterrestrials: Where Are They?* (Cambridge: CUP)

[80] Newman W I and Sagan C (1981) Galactic civilizations: population dynamics and interstellar diffusion. *Icarus* 46 293-327

[81] Crawford I A (2000) Where are they? *Scientific American* 283 (7) 28-33

[82] Landis G A (1998) The Fermi paradox: an approach based on percolation theory *J. Brit. Interplanetary Soc.* 51 163-6

[83] Stauffer D (1985) *Introduction to Percolation Theory* (London: Taylor and Francis)

[84] Bracewell R N (1960) Communication from superior galactic communities. *Nature* 186 670-1

[85] Rood R T and Trefil J S (1981) *Are We Alone?* (New York: Charles Scribner's)

[86] Dyson F J (1960) Search for artificial sources of infrared radiation. *Science* 131 1667

[87] Cernan E and Davis D (1999) *The Last Man on the Moon* (New York: St Martin's Press)

[88] Zuckerman B (1985) Stellar evolution:

motivation for mass interstellar migration. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc.* 26 56-9

[89] Clarke A C (1956) *The City and the Stars* (New York: New American Library)

[90] Jugaku J and Nishimura S E (1991) A search for Dyson spheres around late-type stars in the IRAS catalog. In Heidemann J and Klein M J (eds) *Bioastronomy: The Search for Extraterrestrial Life (Lectures Notes in Physics)* 390 (Berlin: Springer)

[91] Mauersberger R *et al.* (1996) SETI at the spin-flip line frequency of positronium. *Astronomy and Astrophysics* 306 141-4

[92] Whitmire D P and Wright D P (1980) Nuclear waste spectrum as evidence of technological extraterrestrial civilizations. *Icarus* 42 149-56

[93] Sullivan W (1964) *We Are Not Alone* (London: Pelican)

[94] Bahcall J N and Davis R (2000) The evolution of neutrino astronomy. *CERN Courier* 40(6)17-21

[95] Cocconi G and Morrison P (1959) Searching for interstellar communications. *Nature* 184 844-6

[96] Kardashev N S (1979) Optimal wavelength region for communication with extraterrestrial intelligence — λ = 15 mm. *Nature 278* 28-30

[97] Mauersberger R *et al* (1996) SETI at the spin-flip line frequency of positronium. *Astronomy & Astrophysics* 306 141-4

[98] Kuiper T B H and Morris M (1977) Searching for extraterrestrial civilizations. *Science* 196 616-21

[99] The Big Ear site is at http:// www.bigear.org/wow.htm

[100] Schwartz RN and Townes C H (1961) Interstellar and interplanetary communication by optical masers. *Nature* 190 205-8

[101] Betz A (1986) A directed search for extraterrestrial laser signals. *Acta Astronautica* 13 623-9

[102] For information on optical SETI visit http://www.coseti.org/

[103] The SETI Institute is at http://www. seti-inst.edu/

[104] For information on Project BETA visit

http://seti.planetary.org/

[105] For information on Project Argus visit: http://www.setileague.org/argus/

[106] LePage A J (2000) Where they could hide. *Scientific American* 283 (7) 30-1

[107] Cohen N and Hohlfeld R (2001) A newer, smarter SETI strategy. *Sky and Telescope* 101 (4) 50-1. See also Hohlfeld R and Cohen C (2000) Optimum SETI search strategy based on properties of a flux-limited catalogue. *SETI beyond Ozma* (Mountain View, CA: SETI Press)

[108] Drake F D and Sagan C (1973) Interstellar radio communication and the frequency selection problem. *Nature* 245 257-8

[109] Gott J R (1995) Cosmological SETI frequency standards. In Zuckerman B and Hart M H (eds) *Extraterrestrials: Where Are They?* (Cambridge: CUP)

[110] The SETI@home site is at http://www.SetiAtHome.ssl.berkeley.edu/

[111] Lazio T J W, Tarter J and Backus P R (2002) Megachannel extraterrestrial assay candidates: no transmissions from intrinsically steady sources. *Astronomical Journal* 124 (1) to be published

[112] For information on Encounter 2001 visit http://www.daviddarling.info/encyclopedia/E/Encounter2001.html

[113] See http://www.setileague.org/askdr/askdoc.htm

[114] Wigner E (1960) The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences. *Communications in Pure and Applied Mathematics* 13 (1).

[115] Budiansky S (1998) *If a Lion Could Talk* (London: Weidenfeld and Nicolson)

[116] Hersh R (1997) *What is Mathematics Really?* (Oxford: OUP); and Dehaene S (1997) *The Number Sense: How the Mind Creates Mathematics* (Oxford: OUP)

[117] Chaitin G J (1997) *The Limits of Mathematics* (Berlin: Springer)

[118] Minsky M (1985) Communication with alien intelligence. In *Extraterrestrials: Science and Alien Intelligence* E Regis (ed) (Cambridge: CUP)

[119] Freudenthal H (1960) *Design of a Language for Cosmic Intercourse*

(Amsterdam: North Holland)

[120] Caves C M and Drummond P D (1994) Quantum limits on bosonic communication rates. *Rev. Mod. Phys.* 66 481-537

[121] Lachman M, Newman M E J and Moore C (1999) The physical limits of communication, or why any sufficiently advanced technology is indistinguishable from noise.
http://tuvalu.santafe.edu/~moore/ajp.pdf

[122] D'Imperio M E (1978) *The Voynich Manuscript — An Elegant Enigma* (Laguna Hills, CA: Aegean Park Press)

[123] Bester A (2000) *The Stars My Destination* (London: Orion). This is a re-issue of the 1956 novel.

[124] Clarke A C (1953) *Childhood's End* (New York: Del Rey)

[125] Tegmark M and Wheeler J A (2001) 100 years of the quantum. *Scientific American* 284 (2) 68-75

[126] Everett H (1957) "Relative state" formulation of quantum mechanics. *Reviews of Modern Physics* 29 454-62

[127] Turco R P *et al* (1983) Nuclear winter: global consequences of multiple nuclear explosions. *Science* 222 1283-97

[128] Miller Jr W M (1997) *A Canticle for Liebowitz* (New York: Bantam). This is a re-issue of the original 1959 novel.

[129] Drexler K E (1986) *Engines of Creation: The Coming Era of Nanotechnology* (New York: Doubleday)

[130] Freitas R A Jr (2000) Some limits to global ecophagy by biovorous nanoreplicators, with public policy recommendations. Available from:
https://www.researchgate.net/
publication/265873722_Some_Limits_to_Global_Ecophagy_by_Biovorous_Nanoreplicato

[131] See http://nuclear.ucdavis.edu/~rpicha/rhic.html

[132] See Matthews R (1999) A black hole ate my planet. *New Scientist* 28 August pp 24-7

[133] Jaffe R C *et al* (2000) Review of speculative "disaster scenarios" at RHIC. *Rev. Mod. Phys.* 72 1125-40

[134] Hut P and Rees M J (1983) How stable is our vacuum? *Nature 302* 508-9

[135] See http://www.fnal.gov/pub/ferminews/FermiNews98-06-19.pdf

[136] Bird D J (1995) Detection of a cosmic ray with a measured energy well beyond the expected spectral cutoff due to cosmic microwave radiation. *Astrophysical J. 441* 144-51

[137] Gott III J R (1993) Implications of the Copernican principle for our future prospects. *Nature 363* 315-319. For a simplified account see: Gott III J R (1997) A grim reckoning. *New Scientist* 15 November pp 36-9

[138] Buch P, Mackay A L and Goodman S N (1994) Future prospects discussed. *Nature 358* 106-8

[139] Leslie J (1996) *The End of the World* (London: Routledge)

[140] Vinge V (1993) *VISION-21 Symposium* (NASA Lewis Research Center)

[141] Moravec H (1988) *Mind Children* (Cambridge, MA: Harvard University Press)

[142] Searle J R (1984) *Minds, Brains and Programs* (Cambridge, MA: Harvard University Press); Penrose R (1989) *The Emperor's New Mind* (Oxford: OUP)

[143] Knuth D E (1984) *The T_EX book* (Reading, MA: Addison Wesley)

[144] Asimov I (1969) *Nightfall and Other Stories* (New York: Doubleday)

[145] Hart M H (1995) Atmospheric evolution, the Drake equation and DNA: sparse life in an infinite universe. In Zuckerman B and Hart M H (eds) *Extraterrestrials: Where Are They?* (Cambridge: CUP)

[146] Wesson P S (1990) Cosmology, extraterrestrial intelligence, and a resolution of the Fermi-Hart paradox. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc. 31* 161-70

[147] Ward P D and Brownlee D (1999) *Rare Earth* (New York: Copernicus)

[148] Feinberg G and Shapiro R (1980) *Life Beyond Earth* (New York: Morrow)

[149] Asimov I (ed) (1971) *Where Do We Go From Here?* (New York: Doubleday)

[150] Mayr E (1995) A critique of the search for extraterrestrial intelligence. *Bioastronomy News 7* (3)

[151] Carter B (1974) Large number

coincidences and the anthropic principle in cosmology. In *Confrontation of Cosmological Theories with Observation* ed. M S Longair (Dordrecht: Reidel)

[152] Barrow J D and Tipler F J (1986) *The Anthropic Cosmological Principle* (Oxford: OUP)

[153] Livio M (1999) How rare are extraterrestrial civilizations, and when did they emerge? *Astrophysical J. 511* 429-31

[154] Taylor S R (1998) *Destiny or Chance* (Cambridge: CUP)

[155] For news on extrasolar planets visit: https://www.obspm.fr/spip.php?page=recherche_avancee&ordre=on&recherche=plan%C3%A8tes+extra-solaires&lang=fr

[156] Fischer D A *et al.* (2002) A second planet orbiting 47 Ursae Majoris. *Astrophysical J. 564* 1028-34

[157] McBreen B and Hanlon L (1999) Gamma-ray bursts and the origin of chondrules and planets. *Astronomy & Astrophysics 351* 759-65

[158] Dole S H (1964) *Habitable Planets for Man* (New York: Blaisdell)

[159] Dole S H and Asimov I (1964) *Planets for Man* (New York: Random House)

[160] Hart H M (1978) The evolution of the atmosphere of the Earth. *Icarus 33* 23-39; Hart H M (1979) Habitable zones about main sequence stars. *Icarus 37* 351-7

[161] Kasting J F, Reynolds R T and Whitmire D P (1992) Habitable zones around main sequence stars. *Icarus 101* 108-28

[162] Gonzalez G, Brownlee D and Ward P D (2001) Refuges for life in a hostile universe. *Scientific American 285*(4) 60-7

[163] Morbidelli A, Chambers J, Lunine J I, Petit J M, Robert F, Valsecchi G B and Cyr K E (2000) Source regions and timescales for the delivery of water on Earth. *Meteoritics and Planetary Science 35* 1309-20

[164] Cramer J G (1986) The pump of evolution. *Analog 106*(1) 124-7

[165] Annis J (1999) An astrophysical explanation of the great silence. *J. Brit. Interplanetary Soc.* 52 19

[166] Asimov I (ed) (1972) *The Hugo Winners, Volumes 1 and 2* (New York:

Doubleday)

[167] Harland W B and Rudwick M J S (1964) The great infra-Cambrian glaciation. *Scientific American 211* (2) 28-36

[168] Hoffman P F and Schrag D P (2000) Snowball Earth. *Scientific American 282* (1) 68-75

[169] Hoffman P F, Kaufman A J, Halverson G P and Schrag D P (1998) A Neoproterozoic Snowball Earth. *Science 281* 1342-6

[170] Kirschvink J L (1992) Late proterozoic low-latitude global glaciation: the Snowball Earth. In *The Proterozoic Biosphere* ed. J W Schopf and C Klein (Cambridge: CUP)

[171] Raup D (1990) *Extinction: BadGenesorBadLuck?* (New York: Newton)

[172] Gould S J (1986) *Wonderful Life* (New York: Norton)

[173] Alvarez L *et al* (1980) Extra-terrestrial cause for the Cretaceous-Tertiary extinction. *Science 208* 1094-108

[174] Enever J G (1966) Giant meteor impact. *Analog 77* (3) 62-84

[175] Alvarez Q (1997) *T-Rex and the Crater of Doom* (Princeton, NJ: Princeton University Press)

[176] Leakey R and Lewin R (1995) *The Sixth Extinction* (New York: Doubleday)

[177] WalkerJ, Hays P and Kasting J (1981) A negative feedback mechanism for the long term stabilization of the Earth's surface temperature. *J. Geophys. Res. 86* 9776-82

[178] Comins N F (1993) *What if the Moon Didn't Exist?* (New York: Harper Collins)

[179] Woese C R, Kandler O and Wheelis M L (1990) Towards a natural system of organisms: proposal for the domains Archaea, Bacteria, and Eucarya. *Proc. Nat. Acad. Sci. USA 87* 4576-9

[180] Kauffman S (1995) *At Home in the Universe* (London: Viking)

[181] Hartl D L and Jones E W (1998) *Genetics: Principles and Analysis* (New York: Jones and Bartlett)

[182] Watson J D *et al* (1997) *Molecular*

Biology of the Gene (4th edn) (Reading, MA: Benjamin/Cummings)

[183] Sorrell H W (1997) Interstellar grains as amino acid factories and the origin of life. *Astrophysics and Space Science 253* 27-41

[184] Thomas P J, Chyba C F and McKay C P (eds) (1997) *Comets and the Origin and Evolution of Life* (New York: Springer)

[185] Hart M H (1980) *N* is very small. In *Strategies for the Search for Life in the Universe* (Boston: Reidel) pp 19-25

[186] Clark S (2000) *Life On Other Worlds And How To Find It* (London: Springer/ Praxis)

[187] Jakosky B (1998) *The Search for Life On Other Planets* (Cambridge: CUP)

[188] Smith J M and Szathmary E (1999) *The Origins of Life* (Oxford: OUP)

[189] de Duve C (1995) *Vital Dust* (New York: Basic Books)

[190] Cassen P, Reynolds R T and Peale S J (1979) Is there liquid water on Europa? *Geophysical Research Letters 6* 731-4

[191] Kovach R L and Chyba C F (2001) Seismic detectability of a subsurface ocean on Europa. *Icarus 150* 279-87

[192] Fortes A D (2000) Exobiological implications of a possible ammonia-water ocean inside Titan. *Icarus 146* 444-52

[193] Knoll A H and Carroll S (1999) Early animal evolution: emerging views from comparative biology and geology. *Science 284* 2129-37

[194] Boesch C and Boesch H (1984) Mental map in wild chimpanzees: an analysis of hammer transports for nut cracking. *Primates 25* 160-70

[195] Boesch C and Boesch H (1990) Tool use and tool making in wild chimpanzees. *Filia Primatologica 54* 86-99

[196] Visalberghi E and Trinca L (1989) Tool use in capuchin monkeys: distinguishing between performing and understanding. *Primates* 30 511-21

[197] Chevalier-Skolnikoff S and Liska J (1993) Tool use by wild and captive elephants. *Animal Behavior* 46 209-19

[198] Calvin W H (1996) *How Brains Think* (New York: Basic Books)

[199] Gibson K R and Ingold T (eds) (1993)

Tools, Language and Cognition in Human Evolution (Cambridge: CUP)

[200] Griffin D R *Animal Minds* (Chicago: Chicago University Press)

[201] Ovchinnikov I V *et al* (2000) Molecular analysis of Neanderthal DNA from the northern Caucasus. *Nature* 404 490-3

[202] Hoss M (2000) Ancient DNA: Neanderthal population genetics. *Nature* 404 453-4

[203] Tattersall I (2000) Once we were not alone. *Scientific American* 282 (1) 56-62

[204] Tattersall I (1998) *Becoming Human* (Oxford: OUP)

[205] Schick K D and Toth N (1993) *Making Silent Stones Speak: Human Evolution and the Dawn of Technology* (New York: Simon and Schuster)

[206] Leakey R (1994) *The Origin of Humankind* (London: Weidenfeld and Nicolson)

[207] KohnM (1999) *As We Know It* (London: Granta)

[208] Sieveking A (1979) *The Cave Artists* (London: Thames and Hudson)

[209] Quiring R *et al* (1994) Homology of the eyeless gene of Drosophila to the small eye in mice and aniridia in humans. *Science* 265 785-9

[210] Halder G *et al* (1995) Induction of ectopic eyes by targeted expression of the eyeless gene in Drosophila. *Science* 267 1788-92

[211] Rogers L J (1997) *Minds of their Own* (Boulder, CA: Westview)

[212] Olson E C (1988) *N*and the rise of cognitive intelligence on Earth. *Quarterly J. Royal Astronomical Soc.* 29 503-9

[213] Pinker S (1994) *The Language Instinct* (London: Allen Lane)

[214] Lai C S L *et al* (2001) A forkhead-domain gene is mutated in a severe speech and language disorder. *Nature* 413 519-23

[215] Asimov I (1984) *Asimov's New Guide to Science* (New York: Basic Books)

[216] Lines M E (1986) *ANumberFor Your Thoughts* (Bristol: Adam Hilger)

[217] Gould S J (1996) *Life's Grandeur* (London: Cape)

[218] Monod J (1971) *Chance and Necessity*

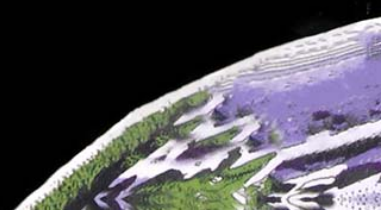
(London: Collins)

Acrónimos utilizados en el libro

SETI	Search for extraterrestrial intelligence
SOHO	Solar and Heliospheric Observatory
WMAP	Wilkinson Microwave Anisotropy Probe
NASA	National Aeronautic and Space Agency
ADN	Ácido desoxirribonucleico
SETI	Search for extraterrestrial intelligence
LIGO	Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory
METI	Messaging Extra-Terrestrial Intelligence
BETI	Beacon Extra-Terrestrial Intelligence
SERENDIP	Search for Extraterrestrial Radio Emissions from Nearby Developed Intelligent Populations
OSETI	Optical SETI
RHIC	Relativistic Heavy Ion Collider
PAP	Principio Antrópico Débil
PAF	Principio Antrópico Fuerte
VLBA	Very Long Baseline Array
BATSE	Burst And Transient Source Experiment
ADN	Ácido desoxirribonucleico
UCLA	Universal Grammar
LAD	Language acquisition device
VAD	Visual acquisition device

¿DÓNDE ESTÁN LOS EXTRATERRESTRES?

Durante una conversación a la hora del almuerzo en Los Álamos hace más de 50 años, cuatro científicos de clase mundial acordaron, dado el tamaño y la edad del Universo, que las civilizaciones extraterrestres avanzadas simplemente tenían que existir. Los números absolutos lo exigían. Pero uno de los cuatro, el renombrado físico e informal Enrico Fermi, hizo la pregunta reveladora: Si la propuesta de vida extraterrestre es cierta, se preguntaba: "¿Dónde están todos?".
En este animado y sugerente libro, Stephen Webb presenta una discusión detallada de las 50 respuestas más convincentes e intrigantes a la famosa pregunta de Fermi, dividida en tres grupos distintos:

• Los alienígenas ya están aquí entre nosotros. Aquí están las respuestas que van desde las de Leo Szilard, que ya están aquí y los conocemos como húngaros, hasta las de aquellos que dicen que los extraterrestes construyeron Stonehenge y las estatuas de la Isla de Pascua.
• Los alienígenas existen, pero aún no se han comunicado. Las teorías en este campo varían ampliamente, desde aquellos que creen que simplemente no tenemos las tecnologías para recibir o interpretar sus señales, a aquellos que creen que las complejidades del espacio y el tiempo van en contra de la comunicación, a aquellos que creen que se están escondiendo activamente de nosotros.
• Los alienígenas no existen. Aquí están los argumentos de los escépticos, desde la teoría de la Tierra Rara hasta el escepticismo del autor.

Las soluciones propuestas van desde las más descabelladas hasta las más graves, pero todas merecen nuestra consideración. La variedad de argumentos —de científicos, filósofos e historiadores de primera línea, y de autores de ciencia ficción— resultan ser ejercicios intelectuales sorprendentes, entretenidos y vigorosos para cualquier lector interesado en la ciencia y en el puro placer del pensamiento especulativo.